

# **Séminaire International Montpellier 2000**

## **« Hydrologie des Régions Méditerranéennes »**

**(Montpellier, France, 11-13 octobre 2000)**

**Programme, Communications, Liste des participants**

**Programme hydrologique international**



# **PHI**

**PHI-V / Documents Techniques en Hydrologie / N° 51**





PROGRAMME HYDROLOGIQUE INTERNATIONAL

---



## **Séminaire International Montpellier 2000 « Hydrologie des Régions Méditerranéennes »**

**(Montpellier, France, 11-13 octobre 2000)**

**Programme  
Communications  
Liste des participants**

**PHI-V Projet 1-1**

---

**PHI-V / Documents Techniques en Hydrologie / N° 51  
UNESCO, Paris, UMR 5569 HydroSciences Montpellier, 2001**



**Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Unesco aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.**

**Edition préparée par l'ensemble des auteurs et finalisée par Eric SERVAT et Jean ALBERGEL, Editeurs scientifiques,  
Christiane OUERTANI et Muriel TAPIAU, pour la mise en page et le suivi de l'édition.**

# SOMMAIRE

PREFACE "Hydrologie des Régions Méditerranéennes" .....	7
Servat E.	
PREFACE "HydroMed" .....	9
Albergel J.	
PROGRAMME .....	11
COMMUNICATIONS	
SÉCHERESSE ET GESTION DES RESSOURCES EN CAS DE PÉNURIE DANS LES PAYS DU SUD ET DE L'EST DU BASSIN MÉDITERRANÉEN .....	19
Albergel J.*, Claude J.* & Habaieb H.** .....	
PRELIMINARY RESULTS OF AN APPROACH IN ASSESSING THE ECOLOGICAL STATUS LOW FLOW IN BULGARIAN RIVERS .....	33
Dakova S.*, Uzunov Y.**, Vachev B.***, Tzankov K.**** .....	
METHODOLOGY FOR REGIONAL LOW FLOW ANALYSIS AND AN APPLICATION.....	39
Önöz B., Bayazit M., Oğuz B. ....	
STUDYING DROUGHTS AT A EUROPEAN SCALE .....	49
Demuth S. and Stahl K.....	
EVALUATION OF REGIONAL DROUGHTS IN EUROPE .....	57
Santos M.J., Veríssimo R., Fernandes S., Orlando M. & Rodrigues R. ....	
BILAN DE L'ÉROSION SUR LES PETITS BASSINS VERSANTS DES LACS COLLINAIRES DE LA DORSALE TUNISIENNE .....	63
Albergel J.*, Nasri N.**, Boufaroua M.***, Pepin Y.* .....	
APPROCHE GÉOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES RELATIONS ENTRE LAC COLLINAIRE ET AQUIFÈRES : CAS DU BASSIN DE KAMECH, TUNISIE.....	71
Gay D.*, Albergel J**, Grunberger O.***, Nasri S.****, Michelot J. L.*****, Montoroi J.P.*** .....	
CHEMICAL EROSION OF A GULLY HEAD: RAINFALL SIMULATION EXPERIMENT ON A GYPSIC MEDITERRANEAN SOIL (FIDH ALI WATERSHED, CENTRAL TUNISIA).....	79
Grünberger O.*, Reyes Gomez V.**, Montoroi J.P*, Dridi B.*** & Agrebaoui .....	
COMPOSITION OF ERODED SOIL UNDER VARIOUS GRAZING INTENSITIES IN MEDITERRANEAN GRASSLAND .....	87
Hellali H.* and Nastis** A. S.....	
FRACTAL THEORY TO SIMULATE UNSATURATED TRANSPORT PROPERTIES .....	93
Persson M.*, Olsson J.**, Albergel J.***, Zante P.***, Nasri S.****, Yasuda H.*****, Berndtsson R.* and Öhrström P.* .....	
STRATÉGIES TRADITIONNELLES DE CONSERVATION DE L'EAU ET DES SOLS EN ZONE MÉDITERRANÉENNE.....	101
Roose E.* et Sabir M.** .....	
MISE EN EVIDENCE DE LA CONTRIBUTION DES DEUX COMPOSANTES DE L'ÉCOULEMENT A LA PRODUCTION DE SEDIMENTS TRANSPORTES EN SUSPENSION DANS LES ZONES SEMI ARIDES : CAS DE L'OUED MOULAH ( NORD OUEST AFRICAIN).	111
Megnounif A., Terfous A., Bouanani A. ....	



ANALYSE MULTIVARIEE DE LA VARIABLE « EROSION SPECIFIQUE » : CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MINA (WILAYA DE RELIZANE – ALGERIE).....	119
Achite M. *, Touaibia B.** .....	119
APPLICATION D'UN MODÈLE GÉOMORPHOLOGIQUE POUR LA SIMULATION D'UNE CRUE EXCEPTIONNELLE ARRIVANT DANS UN PETIT BARRAGE.....	129
Nasri S.*, Albergel J.** , Duchesne J.*** .....	129
INVESTIGATION HYDRO-CHIMIQUE DES SYSTÈMES KARSTIQUES NORD-MONTPELLIERAINS. MODÉLISATION INVERSE DES RELATIONS PLUIE-DÉBIT ET DES VARIATIONS TEMPORELLES DES CONCENTRATIONS. ....	141
Pinault J.L.* , Ladouche B.* , Petit V.* , Doerfliger N.* , Bakalowicz M.** .....	141
HYDROMED MODEL AND ITS APPLICATION ON SEMI-ARID MEDITERRANEAN CATCHMENTS WITH HILL RESERVOIRS .....	151
1- THE RAIFALL-RUNOFF MODEL .....	151
Ragab R.....	151
HYDROMED MODEL AND ITS APPLICATION ON SEMI-ARID MEDITERRANEAN CATCHMENTS WITH HILL RESERVOIRS .....	161
2- RESERVOIR STORAGE CAPACITY & PROBABILITY OF FAILURE MODEL.....	161
Ragab R.....	161
LES PETITS BARRAGES DANS LA ZONE SEMI-ARIDE MÉDITERRANÉENNE.....	167
Albergel J., Selmi S. & Balieu O. ....	167
ENVIRONNEMENT INSTITUTIONNEL ET RÉALITÉS PHYSIQUES POUR UNE GESTION INTÉGRÉE DE L'EAU DANS LE MILIEU SEMI-ARIDE MÉDITERRANÉEN. LE CAS TUNISIEN.....	177
Bachta M. S.* , Le Goulven P.** , Le Grusse Ph.*** , Luc Jean-Paul** .....	177
VERS UNE GESTION OPTIMALE DES RESSOURCES EN EAU. EXEMPLE DE LA TUNISIE. ....	187
Habaieb H.* , Albergel J.** .....	187
OPTIMISATION DES RÈGLES DE GESTION DES BARRAGES COLLINAIRES DANS LES PAYS SEMI-ARIDES.....	195
Lebdi F., Le Goulven P. et Pabiot F.....	195
INTEGRATED MANAGEMENT OF WATER RESOURCES IN THE ARID AND SEMI-ARID REGIONS OF THE MEDITERRANEAN BASIN .....	207
Khouri J. ....	207
MODÉLISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UN HYDROSYSTÈME CÔTIER MÉDITERRANÉEN FORTEMENT ANTHROPISÉ : L'ILE DE CAMARGUE. ....	217
Chauvelon P. *, Tournoud M.G. **, Sandoz A.* , Berceaux A. *, Heurteaux V. * .....	217
MODÉLISATION HYDROLOGIQUE SPATIALISÉE DE PETITS BASSINS VERSANTS EN CONTEXTE SEMI-ARIDE MÉDITERRANÉEN.....	225
Mansouri T.*. Albergel J.*. Séguis L.**.....	225
HYDROLOGICAL MODELLING OF FLOOD EVENTS IN A FARMED MEDITERRANEAN CATCHMENT.....	237
Moussa R.* , Voltz M.* , Andrieux P.*.....	237
ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UN BASSIN VERSANT LIBANAIS PAR UNE MODÉLISATION CONCEPTUELLE ADAPTÉE AU CLIMAT MÉDITERRANÉEN..	243
Najem W., Bocquillon C.** , Jabbour H.* , Hreiche A.* .....	243

<b>SIMULATION ET OPTIMISATION DE LA GESTION STRATÉGIQUE - CAS D'AMÉNAGEMENTS À BUTS MULTIPLES DU SUD DE LA FRANCE.....</b>	<b>249</b>
Pouget J.C.*, Astier J.** , Le Goulven P.* , Rocquelain G.* .....	249
<b>INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE WEST BANK AND GAZA.....</b>	<b>259</b>
Rabi A.* , Karmi N.** .....	259
<b>IMPACT DES AMÉNAGEMENTS SUR LA RESSOURCE EN EAU DANS LE BASSIN DU MERGUELLIL (TUNISIE).....</b>	<b>267</b>
Dridi B.* , Bourges J.** , Auzet A. V.* , Collinet J.** , Kallel R.*** , Garreta Ph.* .....	267
<b>PARAMÉTRISATION DU FONCTIONNEMENT D'UN KARST DANS UN MODÈLE GLOBAL : EXEMPLE DE LA VÈNE (HÉRAULT, FRANCE) .....</b>	<b>275</b>
Tournoud M. G., Dezetter A., Salles C. ....	275
<b>MODÉLISATION DES LÂCHERS DE BARRAGE ET RECHARGE DE LA NAPPE DE KAIROUAN (TUNISIE).....</b>	<b>283</b>
Nazoumou Y. & Besbes M. ....	283
<b>MEASUREMENT OF SOIL MOISTURE IN SMALL CATCHMENTS: A NEW TOOL .....</b>	<b>297</b>
Ramadan R., Job J.O., .....	297
<b>UN MODÈLE D'EXPLORATION DES DYNAMIQUES RESSOURCE-USAGES POUR LA GESTION INTÉGRÉE D'UNE NAPPE SUREXPLOITÉE. APPLICATION À LA NAPPE DE KAIROUAN, TUNISIE.....</b>	<b>305</b>
Feuillette S.* , Garin P.** , Le Goulven P.*** , Bousquet F.**** .....	305
<b>ANALYSE COUPLÉE DU FONCTIONNEMENT TECHNIQUE ET SOCIAL D'UN RÉSEAU D'IRRIGATION : LE CAS DES GROUPEMENTS D'INTÉRÊT COLLECTIF SUR LA NAPPE DE KAIROUAN EN TUNISIE. ....</b>	<b>315</b>
Faysse N., Lardilleux S., Le Goulven P. ....	315
<b>GESTION CONSERVATOIRE DE L'EAU DE LA RETENUE COLLINAIRE SABOUN (TANGEROIS) : BILAN HYDROLOGIQUE ET STRATEGIE COMMUNAUTAIRE .....</b>	<b>321</b>
Mejjati Alami M., Merzouk A. et Berkat O. ....	321
<b>QUELLES DONNEES HYDROLOGIQUES PERTINENTES POUR EVALUER LES RESSOURCES EN EAU DES PAYS MEDITERRANEENS ? .....</b>	<b>327</b>
Margat J. ....	327
<b>OUTSTANDING FLOODS IN ROMANIA - A COMPARISON WITH THOSE OCCURRED IN THE MEDITERRANEAN REGIONS.....</b>	<b>331</b>
Stanescu V. A. ....	331
<b>CONTRIBUTION À L'ANALYSE DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE DU BASSIN MÉDITERRANÉEN .....</b>	<b>339</b>
BIDI F.* , SERVAT E.* , NIEL H.* .....	339
<b>ETUDE DE L'ÉVOLUTION DES SÉRIES PLUVIOMÉTRIQUES DE LA TUNISIE CENTRALE</b>	<b>341</b>
Kingumbi A.* , Bergaoui Z. * , Bourges J.** , Hubert P.*** et Kallel R.****. ....	341
<b>ETUDE SPATIALE DE L'ALEA PLUVIEUX EN REGION MEDITERRANEENNE. APPLICATION À L'ÉPISODE PLUVIEUX DES 12 ET 13 NOVEMBRE 1999 DANS L'AUDE (FRANCE).....</b>	<b>351</b>
Neppel L., Desbordes M. ....	351
<b>PREDETERMINATION REGIONALE DES DEBITS DE CRUE. EXEMPLE D'APPLICATION A LA CORSE.....</b>	<b>357</b>
Lavabre J.* , Folton N.* , Arnaud P.** , Pasquier C.*** .....	357

<b>FLOODS OVER THE CALABRIA REGION (ITALY) AND ITS COMPARISON WITH METEOROLOGICAL ASPECTS OF HEAVY RAINFALLS IN CATALONIA (SPAIN) .....</b>	<b>367</b>
Rigo, T.* , Llasat, M.C.* , Ferrari, E.** , Mancuso, P.** .....	367
<b>INUNDATION OF FLOODED AREAS IN WESTERN BLACKSEA REGION IN TURKEY USING RS/GIS TECHNIQUES .....</b>	<b>373</b>
Şorman A.U.* , Akyürek* Z., Doğanoglu V.I. ....	373
<b>JOINT REGIONAL FLOOD PEAK AND VOLUME FREQUENCY ESTIMATION WITH CANONICAL CORRELATION ANALYSIS .....</b>	<b>381</b>
Taha B.M.J. Ouarda* , Haché M.* , Bruneau P.** and Bobée B.* .....	381
<b>LISTE DES PARTICIPANTS.....</b>	<b>389</b>

## PREFACE

### SEMINAIRE INTERNATIONAL MONTPELLIER2000 HYDROLOGIE DES REGIONS MEDITERRANEENNES

Eric SERVAT, Coordonnateur Général du Projet FRIEND AMHY

Du 11 au 13 octobre 2000, s'est tenu, à Montpellier, le Séminaire International, Montpellier 2000, sur le thème « Hydrologie des Régions Méditerranéennes ». Cette manifestation était parrainée par des organismes et institutions qu'il convient de remercier ici :

- l'UNESCO,
- l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques (AISH),
- Le Comité National Français pour le PHI<sup>1</sup>,
- le Conseil Régional Languedoc-Roussillon,
- le Conseil Général de l'Hérault,
- l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD),
- le Programme Européen HYDROMED<sup>2</sup>,
- le Projet FRIEND AMHY<sup>3</sup>.

La direction scientifique du Séminaire était partagée entre le projet FRIEND AMHY (Coordonnateur Général Eric SERVAT, IRD) et le Projet Européen HYDROMED (Coordonnateur Jean ALBERGEL, IRD). Les régions méditerranéennes se caractérisent globalement par des ressources en eau souvent inégalement réparties et qui constituent, par endroits, de véritables enjeux politiques au regard des fortes sollicitations qu'elles subissent. Il est donc nécessaire d'approfondir la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des régimes hydrologiques en région méditerranéenne au moyen d'ensembles de données régionales. Ce Séminaire avait ainsi pour objectif de faire le point sur l'état des recherches menées en hydrologie au Nord comme au Sud de la Méditerranée.

Il avait également pour ambition d'être un lieu d'échange et de confrontation des thématiques, des données, des méthodes, des connaissances et des résultats acquis par les équipes de scientifiques tout autour de la Méditerranée.

La manifestation « Montpellier 2000 » avait pour but de rassembler, à un instant donné, une large partie de la communauté scientifique hydrologique travaillant en milieu méditerranéen. Cet objectif a été atteint puisque près de 150 personnes ont participé à cette manifestation, en provenance de nombreux pays du pourtour méditerranéen.

Au total, 45 communications orales ont été présentées ainsi que 25 posters.

Le séminaire était organisé en sessions scientifiques et en ateliers thématiques de manière à laisser la place, outre aux présentations scientifiques, aux discussions sur les moyens de mieux organiser les recherches et de mieux coordonner les activités.

Plusieurs thèmes, tous particulièrement d'actualité en milieu méditerranéen, ont ainsi pu être abordés :

- Etiages,
- Erosion,
- Modélisation pluie-débit,
- Gestion intégrée des ressources en eau,
- Analyse des régimes hydrologiques,
- Variabilité hydroclimatologique et pluies extrêmes,
- Crues.

A l'issue de cette réunion, les participants se sont séparés avec la perspective de se retrouver en avril 2003, de nouveau à Montpellier, lors d'une grande Conférence Internationale, ouverte, cette fois, à des scientifiques hors bassin méditerranéen, sur le thème « Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides ». Cette Conférence Internationale devrait, à son tour, contribuer à construire de solides et nécessaires

---

<sup>1</sup> PHI : Programme Hydrologique International de l'UNESCO.

<sup>2</sup> HYDROMED : Programme de recherche sur les lacs collinaires en zone semi-aride du pourtour méditerranéen.

<sup>3</sup> AMHY : Alpine and Mediterranean Hydrology (projet FRIEND de l'UNESCO).

réseaux scientifiques et à souligner les progrès qui auront été accompli d'ici là en s'appuyant sur les résultats présentés en octobre 2000.

## PREFACE

# HYDROMED PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LES LACS COLLINAIRES EN ZONE SEMI-ARIDE DU POURTOUR MEDITERRANEEN

J. ALBERGEL, coordinateur du programme HYDROMED

Depuis une vingtaine d'années, l'IRD<sup>1</sup> s'intéresse à la problématique de la mobilisation de l'eau par des petits barrages dans les zones semi arides intertropicales et méditerranéennes. Des hydrologues et pédologues ont étudié les retenues d'eau du Nordeste Brésilien (Açudes) dans les années 80: dimensionnement et gestion de l'eau. Au début des années 90, une équipe d'hydrobiologistes lançait un projet de recherche sur le fonctionnement bio chimique et sur les potentialités halieutiques des petits barrages du Nord de la Côte d'Ivoire. En 1993, l'IRD signe un contrat avec le Ministère de l'Agriculture tunisien pour installer un réseau de surveillance hydrologique dans le cadre d'un programme de construction de mille petits barrages dans la zone semi aride de Tunisie.

En 1996, l'UR "Dynamique et usages des ressources en eau et des milieux aquatiques" de l'IRD lance un grand programme de recherche sur les petits barrages avec des équipes pluridisciplinaires. Ce programme comprenait 4 chantiers : Nordeste du Brésil, Nord de la Côte d'Ivoire, Nord Mexique, et Méditerranée (Liban, Maroc, Syrie & Tunisie). Pour ce dernier chantier, le succès de la proposition du programme HYDROMED à l'appel d'offres "Sciences et Technologies pour le Développement" de la Commission Européenne a permis la mise en place d'une équipe pluridisciplinaire et multi-institutionnelle pour étudier les petits barrages dans la zone semi aride du pourtour méditerranéen.

Le programme de Recherche HYDROMED est ainsi un projet du quatrième Programme Cadre de Recherche et Développement de la Direction Recherche de la Commission Européenne (1996 - 2000). Il est coordonné par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) et fédère une équipe de recherche pluridisciplinaire de quatre instituts de pays européens ( Espagne, France, Grande Bretagne, Suède) et quatre Instituts des pays tiers méditerranéens (Liban, Maroc, Syrie Tunisie). D'une durée de 10 semestres, il a débuté en novembre 1996.

Il a pour objectif l'étude et la modélisation du fonctionnement hydrologique de petits aménagements de rétention d'eau dans les montagnes semi arides du pourtour méditerranéen appelés lacs collinaires. Il s'intéresse à évaluer l'impact de ces aménagements sur l'environnement et sur les sociétés riveraines et simuler leur devenir en fonction des activités agricoles et des modifications anthropiques dans le bassin versant.

Implantés dans des environnements fragiles et à faible activité économique, ces petits barrages sont perçus comme une ressource supplémentaire, vitale mais incertaine. Le choix des sites d'implantation et la gestion des retenues doivent être en rapport avec des objectifs précis d'ordre conservatoire ou délibérément orientés vers le développement rural.

Le programme HYDROMED, conçu à partir de questions concrètes sur l'aménagement des bassins versants et la gestion de l'eau en zone semi aride, a du développer des recherches fondamentales sur le cycle de l'eau et a obtenu un ensemble de résultats originaux dans les trois domaines suivants :

- Hydrologie des petits bassins versants agricoles des montagnes sèches méditerranéennes et impact des aménagements sur le cycle de l'eau et sur les cycles de sédiments et solutés associés.
- Gestion et usage des eaux des petits barrages, leur rôle sur la conservation des eaux et des sols et dans le développement rural.
- Pérennité des petits barrages et leur intégration dans l'économie régionale pour un développement durable de zones marginales.

En parallèle des actions de recherches, le programme HYDROMED a mené une action d'animation scientifique et une action de formation. L'animation scientifique a été réalisée à travers différents moyens de communication et l'organisation de réunions, ateliers et séminaires.

---

<sup>1</sup> IRD : Institut de Recherche pour le Développement (France), anciennement ORSTOM

Un site Web a été conçu, il est hébergé sur le serveur de l'IRD à Bondy : <http://www.bondy.ird.fr/gp623>. Une lettre électronique : HYDRONEWS est rédigée par le coordinateur suivant les événements et largement diffusée par courriel (10 numéros ont été édités).

Une réunion de coordination annuelle s'est tenue dans les différents pays du programme : Tunis (Février 1997), Damas (Avril 1998), Rabat (Décembre 1999), Montpellier (Octobre 2000).

En s'associant avec différentes institutions, la coordination HYDROMED a organisé deux rencontres internationales sur des thématiques particulières et un séminaire de fin de programme sur les petits barrages dans le monde méditerranéen. (Tunis du 28 au 31 mai 2001).

En juin 1998, la coordination HYDROMED s'est associée à l'Université de Lund pour organiser sous les auspices du SIDA<sup>2</sup> un atelier international sur la collecte, le stockage et la valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale à Lund. De nombreux spécialistes internationaux ont été invités pour la circonstance : Prof. Prinz d'Allemagne, Prof. Hoybye de Suède, Dr Zhu de Chine... Des actes de cet atelier ont été publiés.

En Octobre 2000, les coordinations des programmes FRIENDAMHY et HYDROMED organisent conjointement un séminaire sur l'hydrologie méditerranéenne. Ce séminaire tenu sous les auspices de l'IRD, de l'AISH<sup>3</sup>, de la Région du Languedoc et du département de l'Hérault a réuni une centaine de spécialistes de l'hydrologie méditerranéenne. Sur le plan hydrologique, les programmes FRIENDAMHY et HYDROMED sont complémentaires. FRIENDAMHY étudie l'hydrologie des bassins contrôlés par les réseaux de mesures hydrométriques des services nationaux assurant la gestion de la ressource en eau. Il s'agit, en général, de bassins versants de grande et moyenne dimension où l'unité de temps est au moins la journée pour les phénomènes hydrologiques. Les aménagements hydrauliques sont de grands barrages, des forages ou des ponts importants. HYDROMED étudie les processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant rural élémentaire et modélise des événements hydrologiques au pas de temps de quelques minutes. Les aménagements hydrauliques sont les petits barrages, les rectifications des lits de rivières, les aménagements de conservation des eaux et des sols sur les versants.

*Le programme HYDROMED a soumis une trentaine de propositions de communications au comité scientifique du séminaire. Douze ont été acceptées pour être présentées oralement, elles sont publiées dans cet ouvrage, les autres ont été présentées sous forme de posters. Parmi les communications publiées dans cet ouvrage par des chercheurs du programme HYDROMED on remarquera :*

- Une publication sur les problèmes de sécheresse et la réponse apportée par les petits aménagements.
- Quatre papiers sont dédiés à l'analyse des processus d'érosion et / ou de transferts d'eau et de solutés dans les petits bassins de montagnes sèches.
- Quatre communications présentent des modélisations "pluie / débit" appliquées aux petits bassins versants de lacs collinaires.
- Les trois autres publications sont relatives à la gestion de la ressource en eau et / ou à l'aménagement du petit bassin versant rural en zone méditerranéenne semi-aride.

---

<sup>2</sup> SIDA : Swedish International Development Agency

<sup>3</sup> AISH : Association Internationale des Sciences Hydrologiques

## PROGRAMME

---

**Mercredi 11 octobre**  
**Wednesday, October 11**

---

9h00 - Accueil  
9:00 a.m. - Welcome

9h30 – Ouverture du séminaire – Président Agropolis, E. Servat, J. Albergel  
9:30 a.m. – Opening of the seminar

10h-10h30 - Pause café  
10:00 a.m. - 10:30 a.m. - Coffee Break

### **SESSION ETIAGES**

#### **SESSION LOW FLOWS AND DROUGHTS - CHAIRMAN : PR. A. BULU**

10h30 - 10:30 a.m. - *Sécheresse et gestion des ressources en cas de pénurie dans les pays du Sud et de l'Est du bassin méditerranéen.*  
ALBERGEL J., CLAUDE J.

10h50 - 10:50 a.m. – *Preliminary results of an approach in assessing the ecological status low flow in Bulgarian rivers.*  
DAKOVA S., UZUNOV Y., VACHEV B., TZANKOV K.

11h10 - 11:10 a.m - *Methodology for regional low flow analysis and an application.*  
BAYAZIT M., ONOZ B., OGUZ B.

11h30 - 11:30 a.m.- *Studying droughts at an European Scale.*  
DEMUTH S. , STAHL K.

11h50 – 11:50 a.m. - *Evaluation of regional drouthts in Europe.*  
SANTOS, VERISSIMO, FERNANDES, ORLANDO, RODRIGUEZ

**12h30 – 13h00 - Ateliers thématiques FRIEND - ETIAGES**  
**12:30 a.m. – 1:00 p.m. - Workshops FRIEND - DROUGHTS**

13h00 - 14h30 - Déjeuner  
1:00 p.m. - 2:30 p.m. - Lunch break

### **SESSION EROSION - CHAIRMAN : PR. MORENO**

14h30 - 2:30 p.m. - *Etude de l'érosion des petits bassins versants à partir de la mesure de l'envasement de petits barrages. Exemple du semi-aride tunisien.*  
ALBERGEL J., NASRI S., BOUFAROUA M., PEPIN Y.

14h50 - 2:50 p.m. - *Les terres rares et les métaux comme traceurs potentiels des différentes sources d'apport à l'étang de Thau.*  
ELBAZ F., SEIDEL J.L., ABDULLAH M.



15h10 - 3:10 p.m. - *Approche géochimique et isotopique des relations hydrologiques entre lac de retenue et aquifères. Cas du lac collinaire de Kamech, Tunisie.*

GAY D., ALBERGEL J., GRUNBERGER O., MICHELOT, MONTOROI J.P.

15h30 - 3:30 p.m. - *Evaluation par simulation de pluie de l'érosion chimique d'une tête de ravine d'un bassin versant méditerranéen (cas de Fidh Ali, Tunisie centrale)/Evaluation by rainfall simulation of soil weathering of a gully head in a Mediterranean watershed (...)*

GRUNBERGER O., REYES V., MONTOROI J.P.

15h50 - 16h20 - Pause

3:50 p.m. - 4:20 p.m. - Break

#### **SESSION EROSION - CHAIRMAN : PR. MORENO**

16h20 - 4:20 p.m. - *Composition of Eroded soil under various grazing intensities in Mediterranean grassland.*

HELLALI H., NASTIS A.S.

16h40 - 4:40 a.m. - *Fractal model to simulate unsaturated transport properties.*

PERSOON M., YASUDA H., ALBERGEL J., BERNDTSSON R.

**17h00 - 18h00 - Ateliers thématiques FRIEND – EROSION ET TRANSPORT SOLIDE**

**5:00 p.m. - 6:00 p.m. - Workshops FRIEND – EROSION AND SOLID TRANSPORT**

---

**Jeudi 12 octobre**

**Thursday, October 11**

---

**En parallèle :** session Erosion et Transport solide/Erosion and Solid transport – Amphithéâtre

session Modélisation/Modelling – Salle/room B.06

#### **SESSION EROSION - CHAIRMAN : J. ALBERGEL**

9h00 - 9:00 a.m. - *Traditional strategies for soil and water conservation in mediterranean areas.*  
ROOSE E.

9h20 - 9:20 a.m. - *Mise en évidence de la contribution des deux composantes de l'écoulement à la production de sédiments transportés en suspension dans les zones semi arides. Cas de l'Oued Mouilah (Nord Ouest Africain).*

MEGNOUNIF A., TERFOUS A., BOUANANI A.

9h40 - 9:40 a.m. - *Analyse multivariée de la variable "Erosion spécifique". Cas du bassin versant de l'Oued Mina. Algérie.*

ACHITE M., TOUAIBIA B.

**SESSION MODELISATION PLUIE-DEBIT**

**SESSION RAINFALL-RUNOFF MODELLING - CHAIRMAN : PR. W. NAJEM**

9h00 - 9:00 a.m. – *Application d'un modèle géomorphologique pour la simulation d'une crue exceptionnelle arrivant dans un petit barrage.*

NASRI S., ALBERGEL J., DUCHESNE J.

9h20 - 9:20 a.m. – *Investigation hydro-chimique des systèmes karstiques nord-montpellierains. Modélisation globale et modélisation inverse (traitement du signal) des relations pluie-débit et des variations temporelles des concentrations.*

LADOUCHE B., PINAULT J.L., PETIT V., DOERFLIGER N., BAKALOWICZ M.

9h40 - 9:40 a.m. – *HYDROMED model and its application on semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs.*

RAGAB R.

10h-10h30 - Pause café

10:00 a.m. - 10:30 a.m. - Coffee Break

**En parallèle :** session Gestion des Ressources en Eau/Water Resources Management – Amphithéâtre

session Modélisation/Modelling – Salle/room B.06

**SESSION GESTION DES RESSOURCES EN EAU**

**SESSION WATER RESSOURCE MANAGEMENT - CHAIRMAN : PR. F. LEBDI**

10h30 - 10:30 a.m. – *Les petits barrages dans la zone semi aride méditerranéenne.*

ALBERGEL J.

10h50 - 10:50 a.m. - *Environnement institutionnel et réalité physique pour une gestion intégrée de l'eau dans le milieu semi-aride méditerranéen.*

BACHTA M., LE GOULVEN P.

11h10 - 11:10 a.m.- *Vers une gestion optimale des ressources en eau : exemple de la Tunisie.*

HABAIEB H., ALBERGEL J.

11h30 - 11:30 a.m. - *Optimisation des règles de gestion de petits réservoirs d'eau dans les régions semi-arides.*

LEBDI F., LE GOULVEN P., PABIOT F.

11H50 – 11:50 – *Integrated management of water resources in the arid and semi arid regions of the méditerranean basin.*

KHOURI J.

**SESSION MODELISATION PLUIE-DEBIT**

**SESSION RAINFALL-RUNOFF MODELLING - CHAIRMAN : PR. W. NAJEM**

10h30 - 10:30 a.m. - *Modélisation du fonctionnement hydrologique d'un hydrosystème côtier méditerranéen fortement anthropisé l'île de Camargue.*

CHAUVELON Ph., TOURNOUD M.G., SANDOZ A., BERCEAUX A.

10h50 - 10:50 a.m. - *Modélisation hydrologique spatialisée de petits bassins versants en contexte semi-aride méditerranéen.*

MANSOURI T., ALBERGEL J., SEGUIS L.

11h10 - 11:10 a.m.- *Modélisation hydrologique spatialisée des crues sur un bassin versant agricole en milieu méditerranéen.*

MOUSSA R., VOLTZ M., ANDRIEUX P., LAGACHERIE Ph., LOUCHART X., LE FORNER S.

11h30 - 11:30 a.m. - *Analyse du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant libanais par une modélisation conceptuelle adaptée au climat méditerranéen : cas du Nahr Beyrouth.*

NAJEM W., BOCQUILLON C., JABBOUR H.

**11h50 - 12h45 - Ateliers thématiques FRIEND - MODELISATION**

**11:50 a.m. - 0:45 p.m. - Workshops FRIEND - MODELLING**

13h00 - 14h30 - Déjeuner

1:00 p.m. - 2:30 p.m. - Lunch break

**En parallèle :** session **Gestion des Ressources en Eau/Water Resources Management** – Amphithéâtre

session **Modélisation/Modelling** – Salle/room B.06

**SESSION GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU**

**SESSION WATER RESSOURCE INTEGRATED MANAGEMENT - CHAIRMAN : P. LE GOULVEN**

14h30 - 2:30 p.m. - *Simulation et optimisation de la gestion stratégique. Cas d'aménagements à buts multiples du Sud de la France.*

POUGET J.C., ASTIER J., LE GOULVEN P., ROCQUELAIN G.

14h50 - 2:50 p.m. - *Integrated water resources management in Palestine.*

RABI A., CARMI N.

15h10 - 3:10 p.m. - *Impact des aménagements sur la disponibilité des eaux de surface dans le bassin du merguellil.*

DRIDI B., BOURGES J., AUZET A.V., COLLINET J., GARRETA P.

**SESSION MODELISATION**

**SESSION MODELLING - CHAIRMAN : PR. C. BOCQUILLON**

14h30 - 2:30 p.m. - *Paramétrisation du fonctionnement d'un karst dans un modèle global : exemple de la Vène (Hérault, France).*

TOURNOUD M.G., DEZETTER A., SALLES C.

14h50 - 2:50 p.m. - *Modélisation des lâchers de barrage et recharge de la nappe de Kairouan (Tunisie).*

NAZOUMOU Y., BESBES M.

15h10 - 3:10 p.m. - *Une nouvelle méthode de détermination du stock d'eau dans les sols des petits bassins versants.*

RAMADANE R., JOB J.O.

15h30 - 16h00 - Pause

3:30 p.m. - 4:00 p.m. - Break

**En parallèle :** Session Gestion des ressources en eau/Water resources management – (Amphiteatre)

session Analyse du régime hydrologique/ Hydrological regime analysis – (Salle/Room B0.6)

**SESSION GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU**

**SESSION WATER RESSOURCES INTEGRATED MANAGEMENT - CHAIRMAN : A. RABI**

16h00 - 4:00 p.m. - *Gestion par la demande d'une nappe surexploitée en milieu semi-aride méditerranéen.*

FEUILLETTE S., BOUSQUET F., LE GOULVEN P., GARCIN P.

16h20 - 4:20 p.m. - *Analyse du fonctionnement technique et social d'un réseau d'irrigation et impact sur les stratégies individuelles : le cas des Groupements d'Intérêt Collectif tunisiens sur la nappe de Kairouan.*

LARDILLEUX S., FAYSSE N., LE GOULVEN P.

16h40 - 4 :40 p.m. – *Gestion conservatoire de l'eau de la retenue collinaire Saboun (Tangérois) : bilan hydrologique et stratégie communautaire.*

MEJJATI ALAMI M., MERZOUK A., BERKAT O.

**SESSION ANALYSE DU REGIME HYDROLOGIQUE**

**SESSION HYDROLOGICAL REGIME ANALYSIS - CHAIRMAN : PR. V. STANESCU**

16h00 - 4:00 p.m. - *Quelles données hydrologiques pertinentes pour évaluer les ressources en eau des pays méditerranéens.*

MARGAT J.

16h20 - 4:20 p.m. - *Outstanding floods in Romania - A comparison with those occurred in the Mediterranean regions.*

STANESCU V.A.

**17h00 - 18h00 – REUNION FRIEND AMHY**

**5:00 p.m. - 6:00 p.m. – FRIEND AMHY MEETING**

**Vendredi 13 octobre**  
**Friday, October 11**

---

**SESSION VARIABILITE HYDROCLIMATOLOGIQUE ET PLUIES EXTREMES**  
**SESSION HYDROCLIMATOLOGIC VARIABILITY AND EXTREME RAINFALLS –**  
**CHAIRMAN : PR. M.C. LLASAT**

9h00 - 9:00 a.m. – *Variabilité pluviométrique du bassin méditerranéen.*  
BIDI F., SERVAT E., NIEL H.

9h20 - 9:20 a.m. - *Etude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie centrale.*  
KINGUMBI A., BERGAOUI Z., BOURGES J., HUBERT P., KALLEL R.

9h40-10h10 - Pause café  
9:40 a.m. - 10:10 a.m. - Coffee Break

10h10 - 10:10 a.m. - *Analyse de la variabilité climatique dans l'Est du bassin méditerranéen.*  
NAJEM W., BOCQUILLON C., JABBOUR H.

10h30 - 10:30 a.m. - *Etude spatiale de l'aléa pluvieux en région méditerranéenne. Application à l'épisode pluvieux des 12 et 13 novembre 1999 dans l'Aude (France).*  
NEPPEL L., DESBORDES M.

**10h50 - 12h30 - Atelier thématique FRIEND – GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU**  
**10:50 a.m. - 0:30 p.m. - Workshop FRIEND- INTEGRATED WATER RESOURCE MANAGEMENT**

13h00 - 14h30 - Déjeuner  
1:00 p.m. - 2:30 p.m. - Lunch break

**SESSION CRUES**  
**SESSION FLOODS - CHAIRMAN : PR. P. VERSACE**

14h30 - 2:30 p.m. - *Synthèse des crues de la Corse.*  
LAVABRE J., FOLTON N., PASQUIER Ch.

14h50 - 2:50 p.m. - *Floods over the Calabria region (Italy) and its comparison with meteorological aspects of heavy rainfalls in Catalonia (Spain).*  
LLASAT M.C., FERRARI E., MARCUSO P., RIGO T.

15h10 – 15h40 - Pause  
3:10 p.m. - 3:40 p.m. – Break

**SESSION CRUES**  
**SESSION FLOODS - CHAIRMAN : E. SERVAT**

15h40 - 3:40 p.m. - *Inundation of flooded areas in Western Blacksea region in Turkey using RS/GIS techniques.*  
SORMAN U., AKYUREK Z., DOGANOGLU V.

16h00 - 4:00 p.m. - *Joint regional flood peak and volume frequency estimation with canonical correlation analysis.*

OUARDA T., HACHE M., BOBEE B.

16h20 - 17h00 – Clôture

4:20 p.m. - 5:00 p.m. – Closing - E. SERVAT – J. ALBERGEL



# SECHERESSE ET GESTION DES RESSOURCES EN CAS DE PENURIE DANS LES PAYS DU SUD ET DE L'EST DU BASSIN MEDITERRANEEN

Albergel J.\*, Claude J.\* & Habaieb H.\*\*

\* Mission IRD BP-434 1004 Tunis El-Menzah

\*\* Inat 43, avenue Charles Nicolle 1082 Tunis

## RESUME

Le phénomène de sécheresse est récurrent dans toute l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient. C'est l'un des désastres naturels le plus complexe et le moins compris. Son début et sa fin sont difficiles à prévoir. Il se déroule de manière non dramatique et pourtant ses conséquences sont dévastatrices. Il affecte fortement les populations concernées, pèse sur toutes les activités économiques et en particulier l'agriculture, pluviale ou irriguée. Il a une influence négative sur les écosystèmes aquatiques ou terrestres, sur la quantité et la qualité des eaux souterraines et de surface (salinisation).

Sur l'exemple du déficit hydrique observé en 1998-1999 dans les pays du Moyen-Orient, cette communication décrit le phénomène de sécheresse et ses conséquences. La Syrie a été durement frappée par la pire sécheresse connue depuis l'indépendance du pays. Une récente mission FAO/PAM d'évaluation des récoltes et des approvisionnements alimentaires décrit des perspectives particulièrement alarmantes pour les familles d'éleveurs nomades. Une grande part des bergers nomades risque la ruine, avec 4 700 ménages (plus de 30 000 personnes) gravement touchés par les pénuries alimentaires et nécessitant une aide alimentaire d'urgence.

A partir des longues chroniques pluviométriques de Tunisie, nous étudions la fréquence du phénomène dans le monde Méditerranéen, la difficulté de sa prédiction et l'occurrence des années d'extrêmes déficits ou la probabilité de succession plus ou moins longues d'années déficitaires. Sur la chronique de 127 années de pluviométries annuelles observées à Tunis, 47 années sont nettement déficitaires, 31 proches de la moyenne et 49 sont excédentaires. On distingue trois périodes. De 1875 à 1927, la tendance globale est à la sécheresse, la période de 1928 à 1940 est plus humide, une nouvelle phase sèche de 1941 à 1948 et il semble que depuis 1949 une nouvelle phase humide ait commencé avec cependant des années très sèches (1960-61, 1968-69, 1988-89 et 1993-94). La plus longue période de sécheresse se situant entre 1941 et 1948 (8ans).

Suite à cette analyse du phénomène, les facteurs déterminants de son impact sont mis en évidence. A la lumière des études récentes sur la gestion locale de l'eau dans le bassin méditerranéen, nous présenterons différents éléments pour une stratégie de lutte contre la sécheresse. Nous essayerons de dégager les voies de recherche et de coopération qui permettraient une meilleure gestion des aléas climatiques.

## CONTEXTE GENERAL

La maîtrise de l'eau a toujours été un puissant facteur de développement des civilisations du Sud et de l'Est de la Méditerranée (Job, 1992). Depuis la haute antiquité, différents aménagements hydrauliques ont été réalisés pour augmenter l'efficacité des pluies, pour collecter et stocker l'eau ou pour la transporter (El Amami, 1983 ; Prinz, 1995 & 1996 ; Khouri et al, 1995). De la simple citerne enterrée, instrument vital de la survie familiale en zone aride, au grand barrage s'inscrivant dans une politique nationale de garantie d'approvisionnement au profit du plus grand nombre, le stockage de l'eau a toujours figuré au premier rang des préoccupations des états du bassin méditerranéen pour lesquels les années de pénurie sont récurrentes et la ressource limitée (Hamdi & Lacirignola, 1994 ; Jaber, 1997 ; ESCWA, 1998).

Les pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient partagent un environnement aride ou semi-aride dans la plus grande part de leur territoire et possèdent des ressources en eau limitées, exception faite de la Turquie.

Ils connaissent une très forte augmentation de la population, 350 millions en 1995 et 613 millions en 2025 (suivant les prévisions démographiques des Nations Unies pour une croissance moyenne de la population) et doivent faire face à une demande croissante des besoins en eau. La plupart exploitent plus de 50% de la ressource en eau renouvelable et quelques-uns près de 100% (Egypte, Gaza, Israël, Libye, Malte, Tunisie). La ressource disponible par an et par habitant, de 3000 m<sup>3</sup> par an et par habitant aujourd'hui, tombera à moins de 1000 m<sup>3</sup>/an/hab en 2025 dans 11 pays et à moins 500 m<sup>3</sup>/an/hab pour 7 ou 8 pays, ce qui est considéré comme le seuil de pénurie. (Margat & Vallée, 1999). L'agriculture est le premier utilisateur de la ressource en eau avec une politique forte pour le développement de l'irrigation. La demande touristique amplifie la demande en eau en été, les pays du pourtour méditerranéen sont la première destination mondiale. Le développement urbain le long des côtes augmente la demande et les rejets d'eau douce en mer.



A ces prévisions de précarité de la ressource sont associés une estimation croissante de la dépendance alimentaire de ces pays. Les importations en céréales, qui représentent 33% des besoins en 1995, passeraient à 50% en 2025 (Source FAO).

C'est dans ce contexte de précarité croissante de la ressource en eau qu'il faut replacer les problèmes de variabilité inter-annuelle des précipitations et l'occurrence de périodes sèches plus ou moins longues. Cette conférence utilisera le déficit hydrique observé en 1998-1999 dans les pays du Moyen-Orient, pour décrire le phénomène de sécheresse et ses conséquences sur le développement des pays de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. A partir des longues chroniques pluviométriques de Tunisie, elle analysera la fréquence du phénomène, la difficulté de sa prédiction et l'occurrence des années d'extrêmes déficits ou la probabilité de successions plus ou moins longues d'années déficitaires. Dans une troisième partie, nous analyserons les stratégies de lutte contre la sécheresse. Nous essayerons de dégager les voies de recherche et de coopération qui permettraient une meilleure gestion des aléas climatiques.

## LA SECHERESSE 1998-1999 DANS LES PAYS DU MOYEN-ORIENT

Suivant la FAO, plusieurs pays du Proche-Orient ont connu, durant l'année agricole 1998-1999, la plus grave sécheresse enregistrée depuis des décennies. La production vivrière a enregistré des baisses particulièrement fortes en Jordanie, en République islamique d'Iran, en Irak et en Syrie. Selon les estimations actuelles, la production totale de céréales dans la sous-région se chiffrera à environ 52,4 millions de tonnes cette année (y compris le riz usiné), soit près de 10 millions de tonnes ou 16% de moins qu'en 1998 et 12% au-dessous de la moyenne des cinq dernières années.

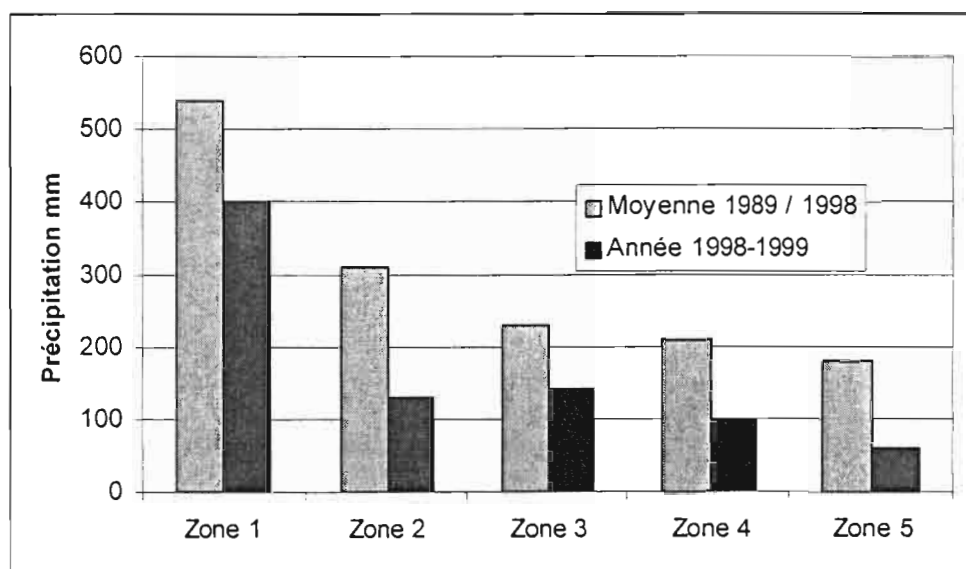
La situation est plus dramatique pour les éleveurs, les taux de mortalité du bétail ayant augmenté du fait de la pénurie de fourrage et d'eau. La sécheresse a de graves répercussions dans de nombreuses régions arides et semi-arides où l'économie est basée sur les exportations de bétail et où les produits de l'élevage fournissent un moyen de subsistance pour de larges segments de la population d'autant plus vulnérable qu'elle dispose de peu de sources de revenu de remplacement.

### Caractéristique climatique de la sécheresse de 1998-1999 en Syrie et en Jordanie

Durant l'année hydrologique (du 1<sup>er</sup> Septembre au 31 Août) 1998-1999, les précipitations ont été inférieures à la moyenne 1989-1998 de 20 à 70% suivant les régions. Le tableau 1 et la figure 1 montre le déficit pluviométrique de cette année, en Syrie, pour 5 grandes régions agro-climatologiques (données FAO) par rapport à la moyenne de la dernière décennie.

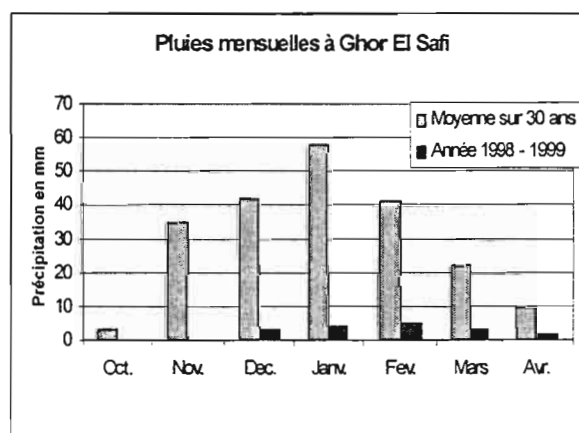
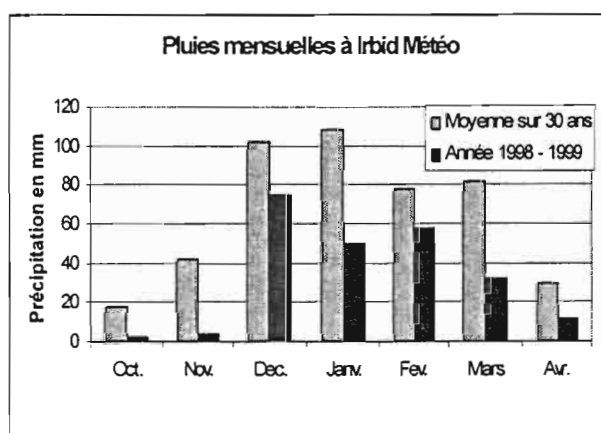
TABEAU 1 : Pluviométrie par région agro-climatologique en Syrie (Données FAO)

Zones agroclimatiques	Superficie Millions ha	Pluviométrie moyenne mm	Pluviométrie moyenne 1998-1999 mm	Déficit 1998-99 /1989-1998 %
Zone 1 (Plaines côtières et anti-Liban)	2.7	Supérieure à 500 mm	400	25
Zone 2 (Nord Tigre et couloir Alep-Homs )	2.5	entre 300 à 500 mm	130	58
Zone 3 (Swaida, Damas, Euphrate)	1.3	entre 200 à 300 mm	140	39
Zone 4 (Palmyre - Raqqa)	1.8	entre 150 à 200 mm	100	52
Zone 5 (Badia )	8.3	inférieure à 150 mm	60	67



*Fig. 1 : Précipitation en Syrie : déficit de l'année hydrologique 1998-1999*

Le phénomène de sécheresse marqué par ces forts déficits pluviométriques a été accentué cette année, par le retard du début de la saison pluvieuse. Les précipitations ont commencé partout avec deux mois de retard, elles ont été mal distribuées. La figure 2 compare les données de pluviométrie mensuelle 1998/99 aux moyennes à long terme dans deux stations jordaniennes représentatives situées l'une dans l'Ouest (hautes terres à fortes précipitations), l'autre dans la vallée du Jourdain. Les caractéristiques sont semblables et confirment la mauvaise année sur le plan pluviométrique en particulier pour la vallée du Jourdain.



*Fig. 2 : Précipitations mensuelles en Jordanie : faiblesse et retard des pluies de 1998-1999 (Source FAO)*

Cette baisse des précipitations s'est accompagnée d'une hausse des températures minimales, (Figure 3) qui a accru l'évapotranspiration et exacerbé les problèmes causés par les ravageurs dans les zones irriguées humides.

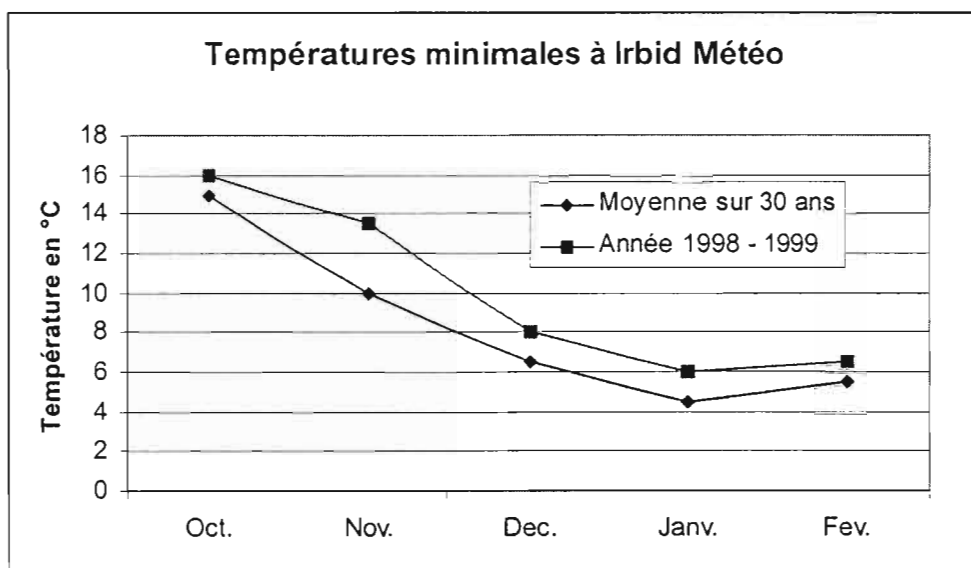


Fig. 3 : Augmentation des températures minimales (source FAO)

### INCIDENCE DE LA SECHERESSE SUR LA PRODUCTION DE CEREALES (DONNEES FAO, PAM) !a)

Dans tous les pays de la région, la production de céréales a nettement chuté en 1998-1999. Avec 13 000t de production (pour une moyenne de 97 000t.), la Jordanie enregistre la plus mauvaise récolte de la décennie (Figure 4). Cette récolte couvrira environ 0,6% des besoins de consommation intérieure, contre 10% en temps ordinaire.

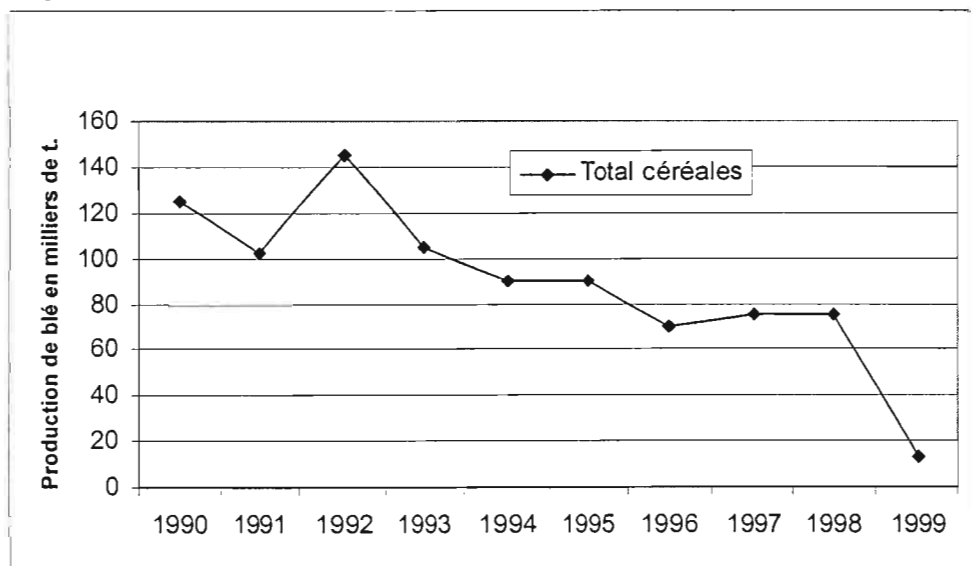


Fig. 4 : Production de céréale en Jordanie (Source FAO)

Les cultures de céréales irriguées ont connu également une chute de rendement mais moins drastique que celles des cultures pluviales. En Syrie, le fait que 40% de la superficie ensemencée en blé soient irrigués explique que cette culture ait été relativement moins touchée que l'orge dont la production estimée à 380 000 tonnes, est inférieure de quelque 72% à la moyenne établie sur cinq ans et de 39% à celle de l'an dernier.

Le blé est essentiellement cultivé sous irrigation ou dans les endroits des zones I, II et III qui bénéficient d'un taux de précipitations relativement élevé. Les rendements ont quand même diminué, et se situent, dans les zones de cultures pluviales, entre 15 et 46% de la moyenne calculée sur 5 ans. La figure 5

montre les variations de production de blé en Syrie au cours de la dernière décennie. La production en blé pluvial est cette année la pire enregistrée.

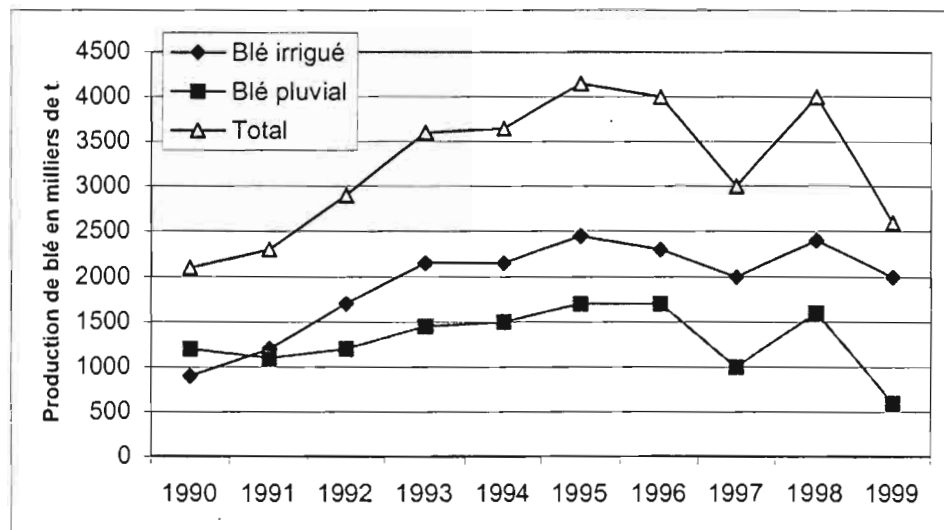


Fig. 5 : Production en blé irrigué et en blé pluvial en Syrie (Source FAO)

## INCIDENCE DE LA SECHERESSE SUR L'ELEVAGE

L'élevage est un secteur important de l'économie régionale. Il emploie environ 20% de la population active et constitue la source de revenu et le mode de subsistance principaux des éleveurs bédouins.

La Syrie compte un cheptel d'environ 15 millions d'ovins, 1.2 millions de caprins, 900 000 bovins, ainsi qu'une assez grande quantité de volailles. Les bovins et la volaille sont essentiellement nourris de maïs et d'orge produits dans le pays, ainsi que de céréales et d'aliments concentrés importés et ont peu souffert de la sécheresse.

D'octobre à janvier, les ovins se nourrissent de fourrages fournis à des prix subventionnés ou achetés sur le marché libre. À la fin de la saison des pluies, de mars à mai, les troupeaux paissent la végétation des parcours, puis dès le mois de mai ou de juin, se déplacent vers les zones agricoles de cultures pluviales ou irriguées (les zones I à IV), où ils sont nourris avec des résidus d'orge, de blé, de betterave sucrière, de coton, de maïs et de légumes. On les mène paître également sur les terrains de parcours situés dans les montagnes côtières.

La sécheresse a eu plusieurs effets sur l'affouragement :

- les faibles précipitations dans toute la région des steppes a freiné le développement des pâturages
- la production d'orge pluvial a enregistré une forte baisse;
- les réserves de résidus de cultures ont également fortement diminué, en raison de la chute de la production agricole.

Selon les estimations de la FAO, la végétation des pâturages n'a pratiquement pas fourni de fourrage en 1998-99, alors que la production de fourrage sec est, dans les années normales, de 165 kg/ha (soit l'équivalent de 94 kg d'orge). Dans les zones de cultures pluviales, la sécheresse a entraîné une diminution d'environ 64% des pailles, qui sont passées d'environ 4,8 tonnes par hectare en moyenne pendant les années normales à 1,7 tonnes par hectare cette année.

Cette pénurie de fourrage a entraîné une forte augmentation du taux de mortalité animale, frappant essentiellement les agneaux nouveau-nés, et une moindre résistance des animaux à diverses maladies. En 1998-99, le taux de mortalité des femelles adultes a été de 10% du troupeau, contre 3% pendant les années normales. Pour les agneaux, ce pourcentage a atteint 25%, contre 4% en temps normal. Les maladies et la pénurie de fourrage ont poussé les éleveurs à réduire considérablement leur troupeau. Ceci a provoqué une baisse du prix des moutons, qui est passé d'environ 4 000 livres syriennes<sup>1</sup> l'an dernier à 600-800 livres syriennes au mois de juillet de cette année.

<sup>1</sup> 1 US \$ = 46 £ syriennes

Cette chute des revenus provenant de la vente des ovins et de leurs produits a amené bon nombre d'éleveurs nomades au bord de la ruine. Les chiffres du tableau 2 montrent cette forte amputation du revenu des ménages. Selon la FAO, les recettes nettes d'un ménage nomade possédant une centaine d'ovins sont passées cette année d'environ 157 000 livres syriennes dans les années normales à un revenu négatif qui s'établit à : - 112 000 livres syriennes.

TABLEAU 2 : Revenus provenant de l'élevage d'ovins 1998/99 comparés aux années normales : 100 têtes dont 65 femelles adultes et 35 animaux de remplacement (Sources FAO)

	Ventes £ syriennes				Dépenses £ syriennes	Revenu net £ syriennes
	Agneau	Lait	Laine	Animaux réforme <sup>3</sup>	Fourrage essentiellement	
Année normale	110 400 <sup>1</sup>	60 000	4 500	15 750	33 600	157 050
1998-1999	28 600 <sup>2</sup>	16 400	4 220	31 500	192 650	-111 930

<sup>1</sup> 46 animaux @ 30 kg/tête x 80 SP/kg

<sup>2</sup> 22 agneaux @ 20 kg/tête x 65 SP/kg

<sup>3</sup> En raison des pénuries de fourrage, le nombre d'animaux de réforme a augmenté en 1998/99

Malgré de meilleures précipitations en 1999-2000, les éleveurs n'ont pas surmonté les effets de cette sécheresse. De fait, il se peut que certains ne puissent plus reconstituer leur troupeau. La FAO, dans ces rapports sur cette sécheresse, indique qu'en automne 1999, 329 000 personnes en Syrie et 180 000 dans le Royaume de Jordanie ont eu besoin d'une aide alimentaire d'urgence.

Pour des pays essentiellement tournés vers l'agriculture, une sécheresse de cette ampleur ressemble à un cataclysme naturel se déroulant de manière progressive, passant dans les médias bien après les tremblements de terre ou les éruptions volcaniques. Les aides d'urgences ont du mal à se mettre en place.

Cette situation météorologique est pourtant récurrente dans l'ensemble des pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord. L'Afrique du Nord souffrait du même type de sécheresse en 1993-1994 et 1994-1995. Les conséquences désastreuses de la sécheresse 1994-1995 sur l'élevage d'ovins au Maroc avait conduit le Roi Hassan II à demander de surseoir au sacrifice rituel de l'Aïd Kebir, l'année suivante pour permettre au troupeau de se reconstituer.

A partir des chroniques de pluviométrie de longue durée, homogénéisées et critiquées de quelques villes tunisiennes, nous allons étudier dans la seconde partie de cette conférence l'occurrence des années d'extrêmes déficits ou la probabilité de succession plus ou moins longues d'années déficitaires

## ETUDE DE LA SECHERESSE A PARTIR DES CHRONIQUES PLUVIOMETRIQUES DE TUNISIE

Cette étude porte sur 9 stations pluviométriques réparties dans six zones agroclimatiques de la Tunisie. Les données de pluviométries annuelles de ces stations ont été homogénéisées sur une période commune 88 années observées (1901 à 1990), (Données DGRE) et deux stations Tunis Manoubia et Kairouan pour lesquelles nous avons eu des données de 1872 à 1998 pour la première et 1901 à 1998 pour la seconde.. Les méthodes d'analyse sont reprises de nombreuses études réalisées en Tunisie : (Bousnina, 1986 ; Sakis, 1990 ; Benzarti, 1990 ; Habaïeb & Benzarti, 1998).

## ETUDE FREQUENTIELLE, VALEUR DES DEFICITS EXTREMES ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS MEDIANES

Une chronique de pluviométrie annuelle représentative de chaque zone climatique est obtenue en faisant la moyenne des postes étudiés dans la zone. Un ajustement statistique est recherché pour chacune de ces chroniques. La figure 6 montre l'ajustement d'une loi de Goodrich à la chronique pluviométrique de Kairouan.

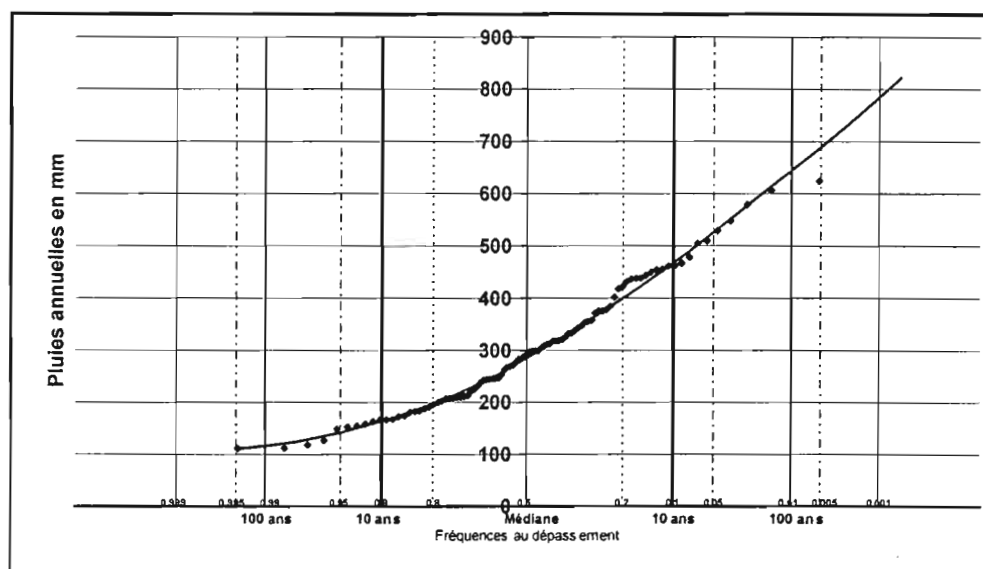


Fig. 6 : Ajustement statistique de la chronique représentant le poste de Kairouan

Le tableau 3 donne les valeurs des pluviométries de fréquence sèche, médiane et humide pour ces 6 régions. Le rapport de la décennale sèche sur la médiane (K10) exprimée en % permet d'apprécier la sévérité des années déficitaires. Plus ce rapport est petit, plus la loi est dissymétrique vers les valeurs de faible pluviométrie. Ce rapport varie entre 40 et 75%, et c'est dans le Nord-Ouest que les précipitations sont les plus régulières.

TABEAU 3 : Valeur de pluviométries pour des fréquences sèches ou humides

Zone	100 S mm	50 S mm	20 S mm	10 S mm	5 S mm	M mm	5 H mm	10 H mm	20 H mm	50 H mm	100 H mm	K10. %
Nord Ouest	466.7	490.6	532.0	574.2	632.4	761.7	908.6	990.4	1059.9	1140.4	1195.1	75.4
Nord Est	219.6	230.2	252.8	280.5	324.2	437.4	583.3	669.6	745.2	834.1	895.4	64.1
Centre	113.9	124.0	143.0	164.0	195.3	274.3	379.9	447.2	510.0	590.1	650.1	59.8
Sahel	130.2	139.2	157.0	177.7	210.2	298.2	425.7	509.8	588.9	688.6	761.7	59.6
Sud Ouest	38.0	46.0	61.1	77.7	101.4	155.2	215.9	249.1	277.0	308.6	329.8	50.1
Sud Est	6.0	14.7	28.9	42.8	61.8	106.5	166.7	206.5	244.7	294.1	331.2	40.2

## ETUDE DES PERIODES DEFICITAIRES PAR LES INDICES DE PLUVIOSITES ET LES ECARTS A LA MOYENNE

Pour situer une pluviométrie dans une longue série de relevés pluviométriques, on utilise l'écart proportionnel à la moyenne :

$$E_i = \frac{P_i}{P_m} - 1$$

$E_i$  = indice de l'année  $i$ ,  $P_i$  = Pluviométrie de l'année  $i$  (mm),  $P_m$  = Moyenne des pluies sur la chronique considérée. Le rapport  $P_i$  sur  $P_m$  est appelé indice de pluviosité.

Une année peut être qualifiée de normale si l'écart à la moyenne est proche de 0. Nous dirons qu'une année est normale si cet écart est compris entre -0.1 et +0.1 (déficit ou excédent inférieur à 10%). L'année est considérée déficitaire lorsque  $E$  est inférieur à -0.1 et excédentaire lorsque  $E$  est supérieur à +0.1.

Le cumul de ces écarts sur des années successives permet de dégager les grandes tendances en faisant abstraction des faibles fluctuations d'une année sur l'autre : quand la somme des indices est croissant on peut dire que la période est humide et vice versa..

Sur la chronique de 127 années de pluviométries annuelles observées à Tunis, l'étude des écarts relatifs à la moyenne montrent que 47 années sont nettement déficitaires, 31 proches de la moyenne et 49 sont excédentaires (figure 7).

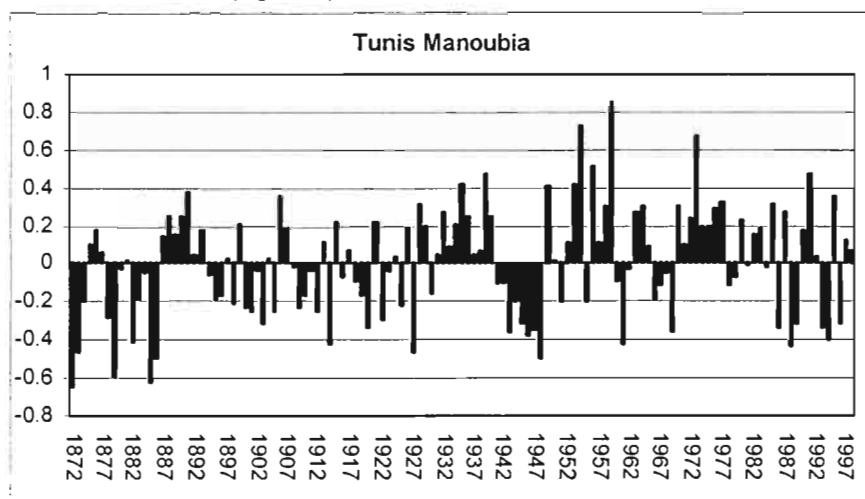


Fig. 7 : Ecarts relatifs à la moyenne des pluviosités Tunis Manouba (1872-1998)

Le cumul de ces écarts permet de distinguer trois périodes. De 1875 à 1927, la tendance globale est à la sécheresse, la période de 1928 à 1940 est plus humide, une nouvelle phase sèche de 1941 à 1948 et il semble que depuis 1949 une nouvelle phase humide ait commencé avec cependant des années très sèches (1960-61, 1968-69, 1988-89 et 1993-94). La plus longue période de tendance à la sécheresse se situe entre 1941 et 1948 (8ans) (Figure 7bis).

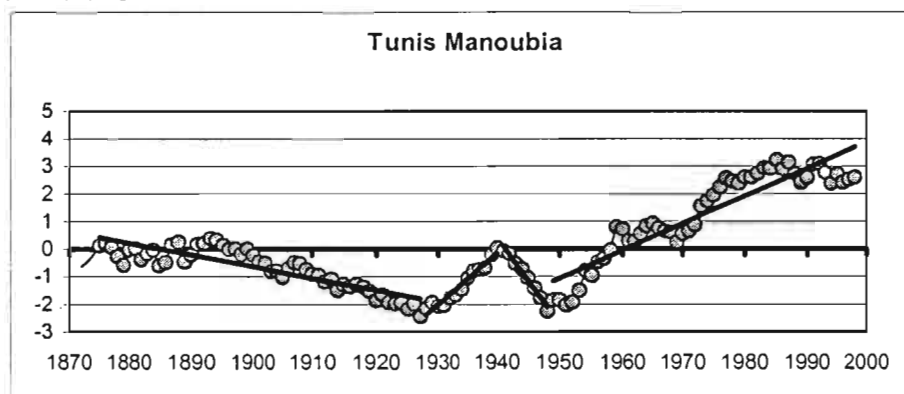


Fig. 7 bis: Ecarts relatifs cumulés Tunis Manouba (1872-1998)

Le tableau 4 consigne les résultats de l'application de la méthode de l'écart à la normale pour les 6 régions agroclimatiques du pays et pour la station de Tunis.

TABEAU 4 : Analyse de la sécheresse par la méthode des écarts à la moyenne

Région	Nbre et % d'années déficitaires	Nbre et % d'années normales	Nbre et % d'années excédentaires	Nbre de séquence sèche > 1 année	Séquence sèche de plus longue durée
Tunis	47 (37%)	31 (24%)	49 (39%)	12	8 ans
Nord Ouest	28 (31%)	37 (41%)	25 (28%)	6	4 ans
Nord Est	35 (38%)	23 (25%)	35 (38%)	6	8 ans
Centre	45 (46%)	20 (20%)	33 (34%)	10	6 ans
Sahel	44 (49%)	17 (19%)	28 (31%)	9	5 ans
Sud Ouest	40 (44%)	15 (17%)	35 (39%)	11	4 ans
Sud Est	46 (53%)	6 (7%)	35 (40%)	6	8 ans

## ETUDE STATISTIQUE DE LA PERSISTANCE DE LA SECHERESSE

En conservant comme critère de sécheresse, le fait qu'une année présente une pluviométrie inférieure à 10% à la moyenne de la chronique, nous nous proposons de calculer les probabilités suivantes :

P1 = Probabilité pour qu'une année de non-sécheresse soit suivie par une année de sécheresse

P2 = Probabilité pour qu'une année de sécheresse soit suivie par une seconde année de sécheresse

P3 = Probabilité pour que deux années successives de sécheresse soient suivies par une troisième année de sécheresse

En utilisant la méthode des chaînes de Markov d'ordre 1 pour le calcul des deux premières probabilités et celles d'ordre 2 pour le calcul de la suivante, (Habaïeb & Benzarti 1998) nous trouvons les résultats présentés au tableau 5, un peu moins sévères que ceux présentés par ces auteurs :

TABLEAU 5 :Application des chaînes de Markov pour calculer une persistance de sécheresse

Région	P1 1 an pas sec/an sec	P2 1 an sec/an sec	P3 2 ans secs/an sec
Tunis (127 années)	22%	15%	14%
Région Nord Ouest	19%	11%	11%
Région Nord Est	19%	23%	22%
Région Centre	23%	24%	23%
Sahel	28%	23%	22%
Région Sud Ouest	25%	35%	34%
Région Sud Est	26%	21%	21%

Ce tableau montre que la persistance d'une sécheresse trois années de suite, sans préjuger de sa sévérité n'est pas un événement exceptionnel. Il a une probabilité de 11% dans le Nord Ouest entre 20 et 25% dans le Nord Est, Centre et Sahel de plus de 30% dans le Sud Ouest. Dans tout le territoire, la probabilité qu'une année sèche soit suivie par une seconde année de sécheresse est à peu près la même que celle qu'une année non sèche succède une année sèche.

Les capacités de régulation interannuelle de la ressource en eau de la Tunisie avec 17 grands barrages, et plus de 2000 forages profonds permettent de satisfaire les demandes les plus urgentes pendant trois ans comme l'a montré le dernier épisode de sécheresse 1993-1995. La poursuite de la politique de mobilisation des eaux devrait conduire ce pays à mobiliser l'ensemble de sa ressource en eau dans très peu de temps (Jeune Afrique économique, Juillet 1994)

Si l'on généralise cette étude menée en Tunisie, pays où sont présents tous les étages du climat méditerranéen, on peut conclure que l'irrégularité des précipitations annuelles est une donnée de ce type de climat. Les déficits pluviométriques comparés aux moyennes peuvent être extrêmes. Ce dernier siècle a connu pratiquement autant d'années déficitaires que d'années "normales" ou excédentaires. L'analyse des tendances montre une fin du 19<sup>ème</sup> siècle plutôt humide (pour quelques stations observées) une première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle avec une tendance à l'assèchement. La période 1950 à 1980 est globalement plus humide et il semblerait que depuis une phase plus sèche ait commencé.

En dernière partie et conclusion de cette conférence, nous aimerions discuter des stratégies contre les effets de la sécheresse et comment la coopération régionale en matière de recherche développement peut aider leur mise en place et les améliorer.

## STRATEGIES DE LUTTES CONTRE LES SECHERESSES

Dans tous les pays de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient, la sécheresse n'est pas un phénomène nouveau. Il est partout intégré par les cultures locales. Toutes les civilisations, qui se sont succédées, ont élaboré des stratégies de lutte contre la sécheresse. L'ancien testament décrit comment les tribus d'Israël ont quitté leur pays et ont demandé l'hospitalité au Pharaon d'Egypte durant une des grandes sécheresses du passé.

Aujourd'hui, les différents Gouvernements, aidés par des organisations régionales et internationales mettent en œuvre différentes stratégies de lutte contre les sécheresses que l'on peut diviser en deux groupes :

- Les grands travaux qui consistent à améliorer l'équipement hydraulique du pays pour la mobilisation et le stockage de l'eau. Les aménagements ruraux de conservation des eaux et des sols, les travaux d'amélioration des parcours.



- L'organisation des structures institutionnelles qui permettent de lutter contre la sécheresse. Ces structures ont comme objectif d'intégrer les risques de "sécheresse" dans la planification économique et de donner aux zones rurales les moyens de résister à la sécheresse. Elles doivent posséder des outils d'aide à la décision pour déclencher un programme d'urgence dès qu'une sécheresse est décelée.

### **Equipement hydraulique et lutte contre la sécheresse**

Durant les décennies 70 et 80, un très grand effort de construction de grands barrages a concerné toute notre région d'étude. Dans la décennie actuelle, une préférence est donnée aux ouvrages de petite et moyenne hydraulique (Albergel & Rejeb, 1997). En Tunisie, par exemple, sur un potentiel de 2100 millions de m<sup>3</sup>/an de ressources en eau de surface techniquement mobilisable par des barrages, 1425 millions le sont (Selmi & Nasri, 1997).

Ces ouvrages ont permis une véritable révolution agricole dans le bassin méditerranéen. La période de trois années sécheresse (1993-1995) a pu être surmontée en Tunisie sans rationner l'eau ni à l'agriculture, ni aux villes, au tourisme ou à l'industrie.

Le talon d'Achille de ces aménagements est la forte évaporation de ces régions et surtout la quantité de sédiments qui viennent chaque année combler les barrages. On estime qu'au Maroc 9 milliards de m<sup>3</sup> s'évaporent chaque année, soit 33% de la pluviométrie donnant 30 milliards de m<sup>3</sup>. L'expérience mondiale évalue le taux de perte annuel en volume des barrages par envasement dans une fourchette de 3 à 10 % (Gazzalo & Bassi, 1969 ; Karouachov, 1977). En Tunisie, le suivi des aménagements montrent une perte moyenne du volume des grands barrages de 25 millions de m<sup>3</sup> par an, soit environ 2% et pour les petits barrages ce volume perdu passe à 5% (Boufaroua & Albergel, 1999). A l'horizon de 2020, de nombreuses régions devront gérer une période post-barrage.

Pour réduire l'envasement des barrages et la perte des terres agricoles, les pays se sont lancés dans des politiques d'aménagement d'ouvrages de conservation des eaux et des sols. Au début de la décennie 1990, la Tunisie, avec l'aide de la Communauté Européenne a mis en œuvre un ambitieux programme de construction de 1000 lacs collinaires et de 200 barrages collinaires dans la zone semi-aride.

Actuellement, le stockage de l'eau dans les aquifères apparaît comme la solution la plus pertinente pour lutter contre des périodes sèches. Elle permet de mettre les excédents stockés pendant les années excédentaires à l'abri de l'évaporation. La taille de ces réservoirs ne risque pas de diminuer. Le seul risque est une pollution par des solutés qui ne seraient pas arrêtés par le milieu poreux traversé durant la phase d'infiltration. De nombreux pays ont reconverti certains barrages pour faire de la recharge de nappes. Le barrage de El Aouareb sur le Merguelill en Tunisie, est géré actuellement essentiellement pour des lâchers d'eau en vue de recharger la nappe phréatique de la vallée de Kairouan, en aval. Cette expérimentation, qui suscite l'intérêt de tous les pays de la région, est suivi dans le cadre du réseau de recherche : "Wadi Hydrology" du Programme International d'Hydrologie (PHI, UNESCO).

Les systèmes karstiques des montagnes calcaires présentent aussi de bonnes possibilités de stockage des eaux. La source de Fighé, qui alimente en partie Damas en eau potable, a un débit de 20 à 30 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> en hiver et de seulement 3 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> en été. On projette de stocker l'excès hivernal (où les besoins sont de 15 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> seulement) dans le sous-sol (sources ACSAD), une étude technique est en cours à ce sujet et une recherche d'aspect plus scientifique est proposée dans le cadre d'un projet INCO-MED de l'Union Européenne.

### **Renforcements institutionnels**

A partir des expériences du passé, les interventions d'urgence à mener en cas de sécheresse s'articulent sur les quatre points suivants :

- l'approvisionnement en eau potable des villes et des campagnes et l'alimentation en eau du bétail,
- la sauvegarde du cheptel sur la base d'une connaissance du déficit fourrager,
- le soutien financier des agriculteurs les plus touchés par la sécheresse et l'approvisionnement en semences en vue de la campagne suivante,
- l'accroissement de l'emploi dans les campagnes. L'un des risques sociaux majeurs des sécheresses est l'exode rural, compte tenu de la baisse des revenus agricoles et de la baisse des emplois saisonniers dans les fermes. L'importance de l'exode agricole (abandon de l'activité agricole par familles qui restent sur leurs fermes) avec le recours à des activités extra-agricoles est un phénomène majeur constaté dans le Maghreb d'aujourd'hui et en particulier en Tunisie. Il a remplacé l'exode rural massif (abandon des terroirs) des années 70 (Aït Amara 1990, Guillemmou, 1999)

Pour programmer et réaliser ces interventions, les Etats mettent en place des structures de prévision et/ou d'identification des sécheresses. Pour prendre leur décision, elles doivent pouvoir compter sur différentes données fiables et suffisamment élaborées pour être interprétées par les instances de décisions.

Ces informations sont de deux sortes : des prévisions et des constats. Les prévisions portent sur les tendances climatiques, les précipitations et l'évaporation, les ressources en eau disponibles et mobilisables, les parcours et les récoltes. Les constats se font dès les premières apparitions du phénomène et portent sur l'état de crise dans chaque région et sur l'efficacité des mesures mises en place, ils doivent accompagner toute la période de sécheresse et en tirer des leçons pour les prochaines.

M. Bernardi (1996) dans une étude de la FAO pour la planification des stratégies anti-sécheresse au Maroc recommande une structure à quatre niveaux où les rôles de chaque entité sont bien déterminés :

- un niveau de base comprenant les fournisseurs de l'information qui font un suivi régulier des indicateurs clé et les prévisions (Comité Agrométéorologique de Suivi de la Sécheresse)
- un deuxième niveau dans lequel on détermine l'impact de la sécheresse dans les différents secteurs de la vie socio-économique du pays (Comité d'Evaluation de l'Impact de la Sécheresse)
- au troisième niveau, on trouve les autorités qui proposent les mesures à prendre sur la base des informations reçues (Cellule de Suivi de la Sécheresse)
- au niveau le plus élevé se trouve le Cabinet du Premier Ministre qui, en concertation avec les Ministères du Plan, des Finances et de l'Agriculture, autorise les actions d'urgence et propose au Gouvernement un plan d'intervention à moyen et à long terme afin d'atténuer les effets de la sécheresse.

Du premier niveau, dépend le programme de stratégie et il est celui où les outils sont encore les moins performants et pour lequel la recherche peut apporter de nombreux éléments.

#### Prévision à long terme

Des informations fiables sur la qualité des saisons à venir faciliteraient la préparation et l'exécution de meilleures politiques de lutte contre la sécheresse, et les investissements nécessaires

Cette prévision à long terme est toujours difficile et reste à une échelle continentale ou régionale. Si aujourd'hui, l'effet de serre est constaté et l'élévation global des températures indéniables, aucune certitude sur les précipitations n'est connue. Sur la rive nord de la Méditerranée de nombreux programmes de recherche ont été initiés sur les conséquences du réchauffement sur les flux d'eau, et leurs nouvelles répartitions entre les différents compartiments du cycle de l'eau (programme européen de recherche sur l'environnement)

#### Prévision à moyen terme

La prévision à moyen terme est celle pour laquelle les bénéfices sont les plus importants. Ces bénéfices sont référés à l'amélioration des outils tels que les systèmes d'alerte rapide, à la rationalisation des planifications des réserves céréalières stratégiques et l'amélioration des échanges des denrées alimentaires entre les pays de la région. Pour la première fois, ceci donne aux Gouvernements la possibilité d'intégrer la variabilité climatique dans le processus de gestion économique (Bernardi, 1996).

Cette prévision devient fiable en particulier sur toutes les infrastructures hydrauliques grâce aux réseaux météorologiques, aux réseaux hydrologiques et piézométriques et aux différents observatoires de la production agricole et des parcours. A cette échelle, des programmes de l'OMM, de l'UNESCO, de l'OSS, encouragent la connexion de l'information et de la prévision : Programme Med Hycos, programme AMHY, les observatoires de l'environnement du projet ROSELT.

#### Prévision à court terme

La prévision pendant la saison en cours a une importance fondamentale dans l'amélioration des modèles de prévision du remplissage des barrages, de l'état piézométrique des nappes souterraines, des rendements des cultures. Une meilleure prestation de ces modèles, avec une résolution majeure tant à l'échelle spatiale que temporelle, pourrait fournir des informations plus fiables au cours de la saison. Ces informations, intégrées avec d'autres telles que le zonage et l'occupation des sols, sont à la base d'un système d'alerte précoce (Bernardi, 1996).

Le progrès de l'imagerie satellitaire et les systèmes d'informations géographiques ont beaucoup contribué au développement de ces modèles.

## CONCLUSION

Cette présentation a essayé de donner une description des sécheresses connues dans les pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Elle a montré que ce phénomène est une donnée intrinsèque du climat méditerranéen. Elle a esquissé un cadre général de la stratégie de lutte contre les effets de la sécheresse à envisager dans un pays exposé à ce risque.

Il est évident qu'elle a gommé les particularismes régionaux qui sont pourtant très importants dans la stratégie de lutte contre la sécheresse. Plusieurs facteurs très régionaux déterminent l'impact économique de la sécheresse: les conditions économiques courantes, la gestion des ressources en eau, les prix des denrées alimentaires, l'importance des activités agricoles dans l'économie régionale, et la place des cultures irriguées, les niveaux des réserves céréalières, les capitaux dont disposent les éleveurs....

Une bonne stratégie de lutte contre la sécheresse doit pouvoir disposer d'informations élaborées sur le climat, les ressources en eau, la production agricole, les parcours et sur l'état économique des populations concernées.

Les outils d'aide à la décision qui vont permettre de prévoir un état de sécheresse et de déclencher un programme d'urgence sont encore balbutiants pour le long terme. Sur le moyen terme, un grand progrès dans la spatialisation des données et la modélisation des agro-systèmes a permis de mieux intégrer les risques de "sécheresse" dans la planification économique. La modélisation hydrologique permet aussi une bonne prévision à moyen terme de l'état de remplissage des barrages et donne un outil précieux pour leur gestion.

Sur le court terme les données obtenues par observations satellitales, combinées à celles collectées au sol par les services spécialisés ont aidé à la constitution d'outils d'aides à la décision très performants.

## BIBLIOGRAPHIE

- AIT AMARA H. (1990) Pression démographique et dynamique des structures agraires au Maghreb. *Le Monde en développement*. Tome 18 - 1990 n°7 p9-17
- ALBERGEL J. & REJEB N. (1997) : Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. *Comptes rendus à l'Académie d'Agriculture de France*. Vol 83 n°2 (1997) 77(2)-88(2) et 101(2)-104(2).
- BENZARTI Z. (1990) : La pluviométrie indice de sécheresse. Tendances pluriannuelles. in *Ressources en eau de Tunisie*. DGRÉ Tunis, pp. 10-22.
- BERNARDI M. (1996) La planification des stratégies contre les effets de la sécheresse. Service de l'Environnement et des Ressources Naturelles (SDRN) FAO Rome. Site Web FAO.ORG
- BOUFAROUA M., ALBERGEL J, PEPIN Y. (à paraître) Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale Tunisienne. 5ème Conf. Inter.de géologie du Monde Arabe, Le Caire, 21-24 fév 2000.
- BOUSNINA A. (1986) : La variabilité des pluies en Tunisie. *Fac des Sciences humaines et sociales de Tunis*. Impr. Offic. 308p.
- EL AMAMI S. (1983) : Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie. CRGR, Tunis, Tunisie.
- ESCWA (1998) : Transboundary water resources in the ESCWA region. Utilization, management and cooperation. E/ESCWA/ANR//7, Nations Unies, New, York.
- GAZZALO T. & BASSI G., 1969. Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituant les bassins versants des cours d'eau italiens. Extraits de publications de l'Agence Italienne d'Hydraulique, n° 53.
- GUILLERMOU Y. (1999) Villes et campagnes en Algérie. Autrepart (11) Paris pp47-60
- HABAÏEB H. & BENZARTI Z. (1998) : Etude de la persistance de la sécheresse en Tunisie en utilisant les chaînes de markov. *journees Scientif. de l'ENGREF*, 28-29/10/98. 23p.
- HAMDI A & LACIRIGNOLA C. (1994) : Water resources management in the Mediteranean basin. In Hamdi A. (ed), *Land and water resources management in the Mediteranean region*. International Conference, Valencano, Bari, 4-8 sept 1994, pp. 1-28, CIHEAM/IAM, Valencano, Italy.
- JABER B. (1997) : La problématique de l'eau au Liban, Ministère des Ressources Hydrauliques, Beyrouth, Liban, 14 p.
- JOB J.O. (1992) : Les premiers aménagements hydroagricoles en Mésopotamie et les problèmes de sels. In : l'aridité, une contrainte au développement, Cornet A. et Grouzis M. ed., *Collection Didactiques*, Orstom, Paris.p : 474-480.
- KARAOUCHOV A.V., (1977) Les débits solides , analyses et répartition géographiques. *Hydrométéoridat*, Leningrad, 238 p.
- KHOURI J., AMER A., Salih A. (1995) : rainfall water management in the Arab region. UNESCO/ROSTA working group. ROSTA, Le Caire.
- MARGAT J. & VALLÉE D. (1999) : Executive summary of the Mediterranean Regional Vision Blue Plan MEDTAC, Stockolm Août 1999.

- PRINZ D. (1995) : Water harvesting in the mediteranean environment. Its past role and future prospects. In Tsiourtis N. (ed), water resources management in the Mediteranean under drought or water shortage conditions. Proceedings, International Symposium, Nicosia, Cyprus 14-18/03/1995, pp. 135-144, Balkema, Rotterdam.
- PRINZ D. (1996) : Water harvesting. History, techniques and trends, Z. f. Bewässerungs - wirtschaft 31, 1, pp. 64-105.
- SAKIS N. (1990) : Les aspects climatiques de la sécheresse. in Ressources en eau de Tunisie.DGRE Tunis, pp. 10-22.
- SELMi S. & NASRI S (1997) : Synthèse préliminaire sur les lacs collinaires de Tunisie. Programme HYDROMED. INGRES-ORSTOM Tunis 1997. 53P.



# PRELIMINARY RESULTS OF AN APPROACH IN ASSESSING THE ECOLOGICAL STATUS LOW FLOW IN BULGARIAN RIVERS

Dakova S.\*, Uzunov Y.\*\*, Vachev B.\*\*\*, Tzankov K.\*\*\*\*

\* *National Institute of Meteorology & Hydrology, Sofia (hydrology)*

\*\* *Central Laboratory of General Ecology, Sofia (hydrobiology)*

\*\*\* *Institute of Nuclear Studies & Nuclear Energy, Sofia (mathematics)*

\*\*\*\* *National Institute of Meteorology & Hydrology, Sofia (hydrochemistry)*

## INTRODUCTION

Bulgaria is situated in the zone of insufficient humidity, and so the water deficit is apparent problem for the country. It has been solved by construction of more than 2120 reservoirs with total volume of 7 200 mil.m<sup>3</sup>, which represent almost 1/3 of the water resources of Bulgaria. The reservoirs and associated structures redistribute the water in time and on the territory, and thus considerably affect the natural flow. All activities on the catchment area and in the river net have potential for an adverse affect on the conditions of aquatic ecosystems in terms of water quantity and quality. From hydrological point of view, one can describe four types of sectors along a streamflow as affected by human activities:

- Stretches with natural flow conditions,
- Stretches of water intakes from the river, where the discharge is lower than the respective natural flow,
- Stretches of water inflow into the river, where the discharge is higher than the natural flow,
- Stretches with the corrections of riverbeds, where the discharge is usually of the same quantity, but some ecosystem quality might be significantly affected.

In Bulgaria, one of the major objectives of the water management policy is the protection and, where it is possible, restoration of aquatic ecosystems to a target status of highest ecological quality. To this end, one of the aims of this policy is to identify the ecologically admissible low flow in order to protect biological diversity and ecosystem integrity of the Bulgarian rivers. This means to obtain such values of the minimum river discharge at which each hydrological parameter meets the given values of the certain water quality class and its biological sufficiency according to the national standards.

The present report discusses the first results of a study on the relations between the river low flow parameters and the respective ecological and hydrochemical characteristics along a model river in the Southwest of Bulgaria.

## STUDY AREA AND DATA

The investigation was performed with the real data as derived from the transboundary River Strouma which runs in the Bulgarian Southwest (Figure 1). The following reasons played role in choosing Strouma as a model flow:

- 1) All four types of affected stretches (as described above) could be identified along the river
- 2) It has been well studied from hydrological, hydrobiological and hydrochemical points of view
- 3) The human impacts on the flow are relatively stable. By 1975, the construction of 56 reservoirs with total volume of 184 mln.m<sup>3</sup> (6% of the mean annual flow at the border with Greece) has been constructed. The main irrigation systems provided consumers with an annual intake of 43% of the mean annual discharge at the border.

The river Strouma runs from North to South and has a length of 290 km in Bulgaria and some 115 km more in Greece. Within Bulgaria, it has catchment area of 10797 km<sup>2</sup>. The Strouma river basin belongs to the Continental-Mediterranean climate zone. The formation of the runoff has rain-snow origin. So, it is generated predominantly in spring and in winter. The flow regime observed at the gauging stations situated along the river is shown on Figure 2. The summer low flow is well expressed on the hydrograph. Normally, low flow begins in the second half of July and finishes to the end of October. The normal duration of low flow period is 2-3 months, but in recent years (1993, 1994, and 2000 without summer rains) the duration of 7 or more months occurred. On the tributaries, which run from the mountains, the hydrograph has two periods of low flow – in winter and in summer. The low flow period usually comes later than on the main river. The flow in August and September is the lowest flow in the river – no more than 4-5 % of the mean annual flow. In years like the current year 2000 the discharge values are equal of the base flow, i.e. the supplementation of

the river is only subsurface. The hydrographs of minimum flow in wet, mean and dry years are shown on Figure 3. Multiannual hydrograph of mean annual and minimum flow of the Strouma at the gauging station Krupnik is shown on Figure 4. Apparently, that the two hydrographs are not similar, which makes the relation between annual flow and minimum flow unusable. Further more the period since 1981 has been abnormally dry period for this region.

Flow characteristics of the Strouma are shown on Table 1

TABLE 1. Flow Characteristics along the Strouma river

Sections	Qmeanann	CVann	Qmin	CV qmin	Qmax	CVqmax
Pernik	2.13	0.25	0.774	0.6	7.677	0.6
Razhdavitza	8.538	0.47	0.52	0.61	43.37	1.14
Krupnik	20.98	0.316	2.669	0.317	99.79	0.393
Boboshevo	37.953	0.421	3.762	1.168	199.59	0.584
Marino Pole	63.44	0.37	6.931	0.466	281	0.492

Three data sets were used for characterisation of the river Strouma collected for a period of 20 years (1980-2000). Hydrological data originated from the 28 gauging stations (as part of the National Hydrological Network) located within the river basin, of them 5 are installed on the main river. The hydrological data include daily, monthly and annual data, river cross-sectional area, stream velocity and depth at each station.

Hydrobiological data set originated from series of biological assessments of the river for the same period. Biological assessment can be defined as the systematic use of biological responses to evaluate changes in the environment with the intent to use this information in a quality control program (Matthews et al., 1982). In terms of the EU Framework Water Directive, these biological responses provide information about the ecological status and, together with the chemical status, form the overall assessment of the environmental status of a river flow.

In Bulgaria, there are several biological/ecological indices in use to assess and monitor the ecological status of the rivers (Table 2). As one can see from the table, all three approaches (as described by Knoben et al., 1995) are presented in the routine practice both for scientific and monitoring purposes in assessing the ecological status of the rivers. Since 1986, five of the above indices (based on the macroinvertebrate communities) have been standardized for the assessment of the water quality. Of them, two saprobic indices provide data about the water quality in terms of organic loading (saprobity) and other three diversity indices do the community integrity (ecological structure or water biological sufficiency) as influenced by the human activities, including pollution. Recently, a Bulgarian Biotic Index (BGBI) have been developed (Uzunov et al., 1998), and together with an Irish Biotic Index (as recommended after an EC/PHARE project), is on the way to be involved in the ecological assessment of the river flows in that country.

TABLE 2. Values of ecological indices for water quality assessment of the Bulgarian inland rivers (according to Ordinance No 7, Official Gazette, 96/19986)

Ecological Indices	Water quality classes			
	I	II	III	*
Pantle & Buck's saprobic index** (SPUB)	<1.5	<2.5	<3.2	>3.2
Rothschein's saprobiological index** (SROT)	>60	>40	>25	<25
Margalef's diversity index (SDIV)	>9.0	<7.5	>3.0	<3.0
Shannon's diversity index** (HIND)	>3.0	>2.0	>1.0	<1.0
Pielou's index of evenness** (EVNS)	>0.7	>0.6	>0.5	<0.5
Simpson's index of dominance** (DOMN)	<0.2	<0.3	<0.5	>0.5
Irish Biotic Index (IBI)	5	4-3	2	1
Bulgarian Biotic Index (BGBI)	10-8	7-4	3-2	1-0

\* non-admissible levels of water quality, \*\* standardized indices

The set of hydrochemical data originated from both hydrological gauging stations and biological assessments during the studied period. Only the main chemical parameters reflecting the oxygen regime and loading with organic matter (also standardized for the aims of water quality assessment and monitoring) were used in the present study.

Based on the requirements of the national water quality standards, the river Strouma is divided into several stretches with different water quality classes. Data sets for 5 representative stations were included in order to describe the dynamics of hydrological, hydrobiological and hydrochemical parameters along the specific stretches with different combinations of impacts (level of pollution and water intake/inflow) on the river ecosystem. During the years 1999 and 2000 synchronized hydrological, ecological and hydrochemical observations have been performed.

In total, data sets derived from 85 cases were studied, including 5 basic hydrological parameters, 10 biological indices and 20 chemical parameters for each of the measurements.

## METHODS

A variety of methods were used to combine and synchronize the data. For more effective data compressions across time and locations, different indexes and module coefficients were obtained and involved.

With the above mentioned hydrological parameters, biological indexes and chemical data, the issue of optimizing the low flow was addressed by two approaches:

- **First approach:** investigations are performed along the river, at several river sections. According the water management systems, the length of river is divided into sections with similar runoff generation conditions. The divided of river into section is performed by a discrete study of specific river stretches dominated by one or another specific anthropogenic impact on the natural flow and/or the water quality.
- **Second approach:** includes investigation in time. It is accepted that on a given time the status of the ecosystem and respectively the biotic indices and water discharge are in a process which have been realized at the moment of their registration. We have good reason to assume that the development level of macrozoobenthos over time is almost the same everywhere along the river from upper reach (Pernic) to the Greece border. This approach permits augmentation of the volume of information.

As a first step, methods of correlation statistics were implemented in order to evaluate the level of existing relations between hydrological, ecological and chemical parameters of the river under study. The available data including 8 biotic indices and simultaneous chemical and hydrological data (discharge, water temperature, cross-sectional, water velocity) are completed in correlation matrices by stations and by periods. The parameter with signification value of correlation coefficient is involved in the multivariate regression model. The parameters with signification correlation coefficient are involved in multiple regression model, to assess the role of separate and combined indices in the relationships between hydrological and ecological features of the studied sites/stretches. The results are shown on Table 3.

Because of multitude of parameters and data variability at some level of uncertainty, a very common problem for analysis and integral assessment of the measurements has arisen. A number of approaches and methods exists for the solution of similar decision making problems (Vachev, 1993). The Analytical Hierarchical Process (Saaty, 1990) have been implemented for this purpose. This is a typical multicriterion, multiexpert decision making problem if the sets of criteria and possible variants have been defined.

The Analytic Network Process (ANP) is a natural generalization of the Analytical Hierarchical Process (AHP), which supports feedback and reflection of interdependencies between the decision and clusters of elements. The main difference between AHP and ANP is the following: hierarchies concern the distribution of a property among the compared elements, aimed to define what is dominating - with a greater amount of a given property; networks dealing with the distribution of the influence of elements on some element with respect to a given property (Saaty, 1996). Some software products based on the above-mentioned theory were developed, of them Expert Choice 8.0 and Expert Choice Pro 9.5 have been used in this work.

Two models are built: first one with 4 main biological indices and second one - with 9 different biological and chemical parameters. Ranking models have made with scale of water quality classes – C1, C2, C3, C4 with weights: 0.5, 0.3, 0.2, 0.0.



TABLE 3.

Sections	R <sup>2</sup>	Included variables
PERNIK III WQC	0.640	HIND
	0.628	SPUB
	0.624	DOMN
	0.720	DOMN, BGBI
	0.822	SDIV, HIND, SPUB
RAZHDAVITZA II WQC	0.700	HIND, DOMN
	0.795	HIND, DOMN, DIOX
	0.796	HIND, DOMN, SPOT
	0.890	T <sup>0</sup> , HIND, DOMN, AMON
	0.91	HIND, DOMN, SDIV, SPUB, SROT, BGBI
KRUPNIK II WQC	0.867	SPEC, BGBI, DIOX, NITRI
	0.878	SPEC, BGBI, DIOX, NITRI, AMON
	0.9	DOMN, EVNS, SROT, BGBI, DIOX, AMON
	0.934	HIND, EVNS, SROT, BGBI, DIOX, AMON
MARINO POLE II WQC	0.597	DIOX
	0.754	AMON
	0.856	AMON, HIND
	0.856	T <sup>0</sup> , HIND, AMON
	0.888	HIND, DIOX, POXY, AMON
	0.895	T <sup>0</sup> , KIND, DIOX, AMON
I WQC	0.58	NUMB, DOMN, BGBI, POXY, NTRI

WQC = water quality class

## RESULTS & DISCUSSION

Using the discrete data series (stretch by stretch), the results obtained were much more satisfactory. There is strong correlation between cenotic parameters and the flow characteristics (i.e. the module). The very specific feature of these relations was the fact that this correlation had different direction (positive or negative) for each site/stretch depending mostly on the water quality/category. In cases of higher pollution (saprobity) level, the larger discharge reflected in worse community parameters. In more stable and moderate saprobic conditions lower discharge caused restructuring the community to figures relevant to lower water quality class.

The possible conclusion is that the relations between the discharge and the community parameters were not one digit determined and many factors played role in forming the biotic responses to the dynamic of hydrological situation at a given site/stretch. The multiple regression analysis showed the participation of all community parameters (Tables 4) (Razhdavitsa)) responsible for assessment of both water quality and its biological sufficiency. Amongst them, all three groups of indices widely used for water quality assessment (see Knoben at al., 1995) are presented: saprobic index (SPUB, SROT), species diversity indices (SDIV, HIND, EVNS, DOMN) and biotic index (BGBI). The total R<sup>2</sup> grew up to 0.822 (for the site of Pernik) and 0.910 (for the site of Razhdavitsa) when only biotic indices were used. In case we included some hydrochemical parameters such as dissolved oxygen (DIOX), ammonia ions (AMON) and biochemical oxygen demand (BOD5), the same figures for R<sup>2</sup> grew up to 0.991 and 0.911 respectively. This is a subject of further discussion whether it is possible to reduce the number of biotic indices in use for water quality assessment while some of them are derivative (like EVNS from HIND) or analogous (like SPUB and SROT) or reciprocal (like DOMN and EVNS). This is still unclear what kind of measure are biotic indices (like BGBI) used in most of the EU countries inspite of their mode of calculation.

Based on these relations, it looks possible to calculate the minimum water discharge (low flow) for each site/stretch in terms of protection of the biological/species diversity and community integrity as formed at a given (planned or actual) water quality class/category.

The results of calculation the ecologically admissible low flow show that the value of flow II water quality class is lower than the respective on the I and III. It is possible to give the follow explanations:

1. There is a non-linear regression between water discharge and ecosystem parameters.
2. The best ecosystem quality (in terms both of biodiversity and integrity) is II water quality class, where the rates of the organic matter production and destruction are the same (i.e.  $P/R = 1$ ).
3. Target ecological status should be a natural equilibrium of the riverine ecosystems, characterized by maximum biodiversity, best community integrity and stable saprobic conditions.
4. Shift from I to II water quality class is relatively easy, but back from III to II class needs much of water for reaching the desirable ecological state of the communities.

## CONCLUSIONS

The main conclusions of the preliminary results represented might be:

1. There is significant correlation between cenotic parameters (used for water quality assessment) and the water discharge at a given level of pollution in terms of water quality classes.
2. At relatively stable water quality (level of pollution) these relations are well expressed for each of the sites/stretches along the river under study.
3. The results discussed above are very supportive in looking for a possible methodic for assessment and determination/calculation of such ecologically friendly low flow values which do not change the cenotic parameters of the river communities and protect the biological diversity within the national standards for each of the water quality classes.
4. The integral assessments of the ecological status of streamflow show some improvements for the last few years.

## ACKNOWLEDGMENTS

The present report is a part of the project No 288-7329/1999 sponsored by the Ministry of Environment & Water.

## REFERENCES

- DAKOVA Sn., UZUNOV Y., MANDADJIEV D. Low flow - the river's ecosystem limiting factor, Ecological Engineering, Elsevier (in print)
- KNOBEN, R.A.E., C. ROOS, M.C.M.van OIRSCHOT. 1995. Biological Assessment Methods for Watercourses. - UN/ECE Task Force on Monitoring & Assessment, vol. 3, 86 p.
- MATTHEWS, R.A., A.L. BUIKEMA, J. CAIRNS, J.H. RODGERS. 1982. Biological monitoring: Part IIa: Receiving system functional methods, relationships and indices, Water Res., 16: 129-139.
- SAATY, T. 1990. Multicriterial decision making: the analytical hierarchy process, AHO Series, RWS, v. 1, 502 pp.
- SAATY, T. 1996. Decision making with dependence and feedback: the analytic network process, RWS, 386 pp.
- UZUNOV, Y., L. PENEV, S. KOVACHEV, P. BAEV. 1998. Bulgarian Biotic Index (BGBI) - an Express Method for Bioassessment of the Quality of Running Waters - Comp.Rend.Bulg. Acad.Sci., 51, No 11-12: 117-120.
- VACHEV B. 1993, Research Procedure and Criteria for Analysis and Choice of Variants for Construction of National Radioactive Wastes Depository, In: *IAEA regional project for technical assistance PET/9/010. Recommendations on Management of Radioactive Wastes from VVER*, 22-26 Feb., 1993, Sofia, 23-40.
- \*\*\* Ordinance No 7 of the Council of Ministers on standards and indices for assessment of the water quality of superficial running waters, Official Gazette, 96, 1986.



# METHODOLOGY FOR REGIONAL LOW FLOW ANALYSIS AND AN APPLICATION

Önöz B., Bayazit M., Oğuz B.

*Division of Hydraulics, Istanbul Technical University, 80626 Istanbul, Turkey*

## ABSTRACT

Regional analysis of low flows helps to increase the information used in the frequency analysis over that supplied by the at-site data. A methodology is presented for this analysis. Selection of the sites to be included, choice of the probability distribution function and parameter estimation method, goodness of fit testing, treatment of zero values are discussed. On an example it is found that power distribution with parameters estimated by LL-moments has the best fit to regional low flow data among the 2-parameter probability distributions.

## KEYWORDS

**Regional analysis, low flows, frequency analysis**

## INTRODUCTION

Estimation of the characteristics of low flows of a stream is important in water supply planning, water quality management, navigation and for determining release policies from storage reservoirs in dry periods. Low flows are usually characterized by the annual minimum average discharge for a certain duration, such as 7 days. The probability distribution of the 7-day minimum flow should be known to estimate its value for a given return period, e.g. 10 years. The selected distribution function should have a good fit to the lower tail of the data.

In many cases available data are not of sufficient length to make reliable estimates on the basis of at-site observations only. Regional analysis may be helpful in such a case where data from a nearby homogeneous region are considered in determining the probability distribution function.

Regional analysis has been used extensively in flood studies but only a few studies have been found in literature concerning low flows. By regional analysis it should be possible to improve the quality of low flow estimates over the at-site analysis and to obtain estimates at ungaged sites.

Most of the work on regional procedures in low flow analysis is restricted to those estimating low flow statistics by regression upon basin characteristics, which are shown to have large prediction errors (Stedinger et al., 1993). Gustard and Gross (1989) adopted the 2-parameter Weibull distribution as the regional probability distribution of low flows. Vukmirovic et al.(1998) discussed the steps in regional statistical analysis of low flows, such as regional homogeneity investigation, regression with basin area and determination of the probability distribution function. Durrans and Tomic (1996) analyzed the low flows observed in the State of Alabama and concluded that the log Pearson Type 3 distribution is a suitable candidate for modeling them, when the shape parameter is estimated on a regional basis.

In this study methodology for performing regional low flow analysis is presented. First step is to select the flow gaging stations to be included in the study and to apply discordancy analysis with the aim of detecting the sites in the region that are not homogeneous with the others. Simple and multiscaling analysis is then made to decide whether simple relationships hold between the statistical parameters and drainage basin areas of various sites in the region.

Having found that non-dimensional low flows of the sites in the region follow a single distribution, the best-fit probability distribution function is chosen from among the candidates.

2- and 3-parameter probability distribution functions have been used for low flows. This study is confined to the investigation of 2-parameter distributions to reduce the sampling errors in parameter estimation. It is found that at some sites data at the lower tail follow a different distribution, in which case parameters should be estimated to give weight to lower flows.

In some regions low flow data at certain sites may have some zero observations. It is discussed how these sites should be treated in regional analysis.

The application of the method developed in the study is explained on an example.

## SELECTION OF THE SITES

Regional low flow analysis starts by identifying a hydrometeorologically homogeneous region. This should be done by considering the geomorphological and climatic characteristics of the drainage basins to the extent possible. It is then necessary to eliminate the sites with data that have frequency distributions not similar to the others. Hosking and Wallis (1993) proposed a discordancy measure  $D$  in terms of the L-moments of the data to identify the sites that are grossly discordant with the group as a whole. A site is declared to be discordant if its discordancy measure  $D_i$  exceeds 3. If any site is found to be discordant with the region as a whole, it should be removed from the analysis. It is advised that the data for sites with largest  $D_i$  values should be further examined even when all  $D_i$  are smaller than the critical value. Later, Hosking and Wallis (1997) gave critical  $D$  values as a function of the number of sites in the region.

## SCALING ANALYSIS

Scaling analysis is related to the understanding of spatial variability of hydrologic processes in river basins (Gupta and Waymire 1990). Simple scaling implies that a statistical characteristic of streamflow at a certain site  $i$  such as the 7-day minimum flow, has quantiles  $q_{pi}$  that are related to the drainage basin area  $A_i$  as  $q_{pi} \propto A_i^\alpha$  where  $\alpha$  is the same for all  $p$ . In this case statistical moments  $\mu_i^k$  of the variable has the relationship  $\mu_i^k \propto A_i^{g(k)}$  to the area  $A_i$  where  $g(k) = \beta k$ ,  $\beta$  same for all  $k$ , the order of the statistical moment (Gupta et al. 1994).

Simple scaling (self-similarity) implies invariance of the probability distribution at all the sites when the variable is scaled (indexed) by the area of the site. Coefficient of variation  $C_{vi}$  and other non-dimensional statistical parameters are then constant for all sites.

Multiscaling is a more general case where  $\alpha$  is a function of  $p$ , and  $g(k)$  is not proportional to  $k$  but any function of  $k$ ,  $C_{vi}$  varies with  $A_i$ .

## PROBABILITY DISTRIBUTION FUNCTIONS

In this study three 2-parameter probability functions are considered as candidates for the regional distribution of low flows. Two of these, 2-parameter lognormal distribution LN2 and 2-parameter Weibull distribution W2 have been widely used for low flows. The third distribution is the power distribution P2 proposed by Önöz and Bayazit (1998).

L-moments are used for the estimation of the parameters of W2 and P2 since it is known that they give nearly unbiased and quite efficient estimates. For W2 following expressions relate the parameters to the L-moments (Stedinger, et al. , 1993):

$$L - CV = 1 - 2^{-1/k} \quad L1 = \alpha \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (1)$$

where  $L1 = \mu_x$  is the mean ( $=1$  for data made non-dimensional dividing by the mean),  $L-CV$  is the ratio of  $L2$  to  $L1$ ,  $\alpha$  and  $k$  are the scale and shape parameters, respectively,  $\Gamma$  is the gamma function.

Power distribution P2 has the following cumulative probability distribution function:

$$F(x) = (x / x_0)^c \quad x \leq x_0 \quad (2)$$

where  $x_0$  and  $c$  are the upper bound and shape parameter, respectively.

Parameters of the power distribution are related to the L-moments as (Önöz and Bayazit 1998):

$$c = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{L - CV} - 1 \right) \quad x_0 = \frac{(1+c)L1}{c} \quad (3)$$

## TESTING THE GOODNESS OF FIT

Goodness of fit of the candidate distributions can be investigated by statistical tests. A quite powerful test is the probability plot correlation coefficient (PPCC) test. Critical values of the PPCC tests are given by Vogel and Kroll (1989) for W2, Öñöz and Bayazit (1998) for P2.

The main purpose of the low flow frequency analysis is to estimate the quantiles corresponding to large return periods. Therefore smaller observations should be given higher weights in parameter estimation. It is observed that at some sites the lower tail of the distribution of minimum flows seems to follow a different curve than the remaining data (see e.g. Fig.1). In this study modified L-moments called LL-moments proposed by Öñöz and Bayazit (1998) are used to give more weight to the smaller observations. LL-moments differ from L-moments in that  $LL_m$ -moment of order  $r$  is based on the expectations for the  $r$  smallest elements of a subsample of size  $r+m$  instead of size  $r$ ,  $m$  being a positive integer. For  $m=0$ ,  $LL_m$ -moments reduce to L-moments.

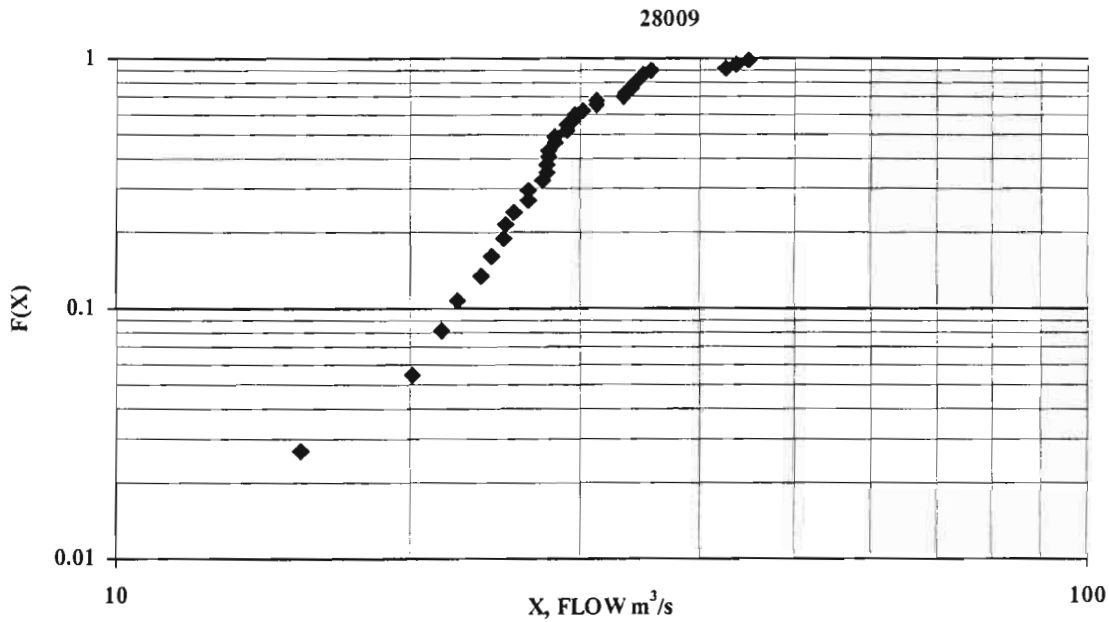


Fig. 1 : An example of low flow data where smaller observations seem to follow a different curve.

PPCC test is not sensitive to the method of parameter estimation for 2-parameter distributions like W2 and P2 when a Weibull-type plotting position formula of the form

$$F(x_i) = (i-a)/(n+1-2a) \quad (4)$$

is used (Vogel and Kroll, 1989), where  $i$  is the rank of the observation  $x_i$  in an ordered sample of size  $n$ . The reason for this is that the probability plots of these distributions plot  $\ln x_i$  against  $\ln[-\ln(F(x_i))]$ . Therefore PPCC test cannot be used to compare the goodness of fit of these distributions whose parameters are estimated using  $LL_m$ -moments with different values of  $m$  when Eq.(4) is used with any value of  $a$  as the plotting position formula.

For P2 distribution Öñöz and Bayazit (1998) obtained the following expression for the plotting position formula corresponding to  $F(E(x_i))$  where  $E(x_i)$  is the expected value of the observation of rank  $i$  in a sample of size  $n$  (Gumbel 1958):

$$F(x_i) = \left[ \prod_{j=0}^{n-i} \frac{i+j}{i+j+\frac{1}{c}} \right]^c \quad (5)$$

Since this formula contains the parameter  $c$ , PPCC test becomes sensitive to the method of parameter estimation when Eq. (5) is used for P2 distribution. A similar formula could not be obtained for W2 distribution.

Parameters of W2 distribution can be estimated in terms of LL-moments by the expressions:

$$\begin{aligned} LL_m - CV &= \left(1 + \frac{m}{2}\right) \left[1 - (1+m)^{1/k} (2+m)^{-1/k}\right] \\ LL_m 1 &= \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) / (1+m)^{1/k} \end{aligned} \quad (6)$$

where  $LL_m 1$  is the first order  $LL_m$  moment and  $LL_m - CV$  is the ratio of the second order  $LL_m$  moment to  $LL_m 1$ . For the P2 distribution corresponding equations are:

$$\begin{aligned} c &= \frac{1}{2+m} \left[ \left(1 + \frac{m}{2}\right) \frac{1}{LL_m - CV} - 1 \right] \\ x_0 &= \frac{(1+c)(1+2c) \dots [1 + (1+m)c]}{(1+m)! c^{1+m}} LL_m 1 \end{aligned} \quad (7)$$

For  $m=0$ , Eq. (6) reduces to Eq.(1) and Eq. (7) to Eq.(3).

To compare the overall goodness of fit of W2 distribution whose parameters are estimated by  $LL_m$ -moments with different values of  $m$ , another approach is used that is explained below. Same method is also used for P2 distribution.

For a certain model (probability distribution function plus parameter estimation method) quantiles corresponding to nonexceedance probabilities 0.1, 0.2, 0.3, ..., 0.7 are computed (higher probabilities are not used since emphasis is on fitting of the lower tail) and compared with the regional average of the at-site data corresponding to those probabilities. Bias and rmse (root mean square error) of the differences between observed and predicted values are calculated for each model. These quantities are used in comparing the goodness of fit of various models.

## APPLICATION

Methodology described above is applied to the Gediz river basin in Western Anatolia, Turkey, along the coast of the Aegean Sea. Total area of the basin is about 18000 km<sup>2</sup>. There are 12 flow-gaging stations, one of them is affected by the regulation of the reservoirs upstream and is not considered in this study.

7-day annual average minimum flow is chosen as the representative low flow variable. At 5 stations some of the years have zero 7-day minimum flows. Three of these have more than 60% zeroes and are not included in the regional analysis. Data of remaining 8 stations are used in the regional analysis (Table 1). Record lengths vary from  $N=17$  to 33 years. Number of years with zero flows is  $N_0=4$  at one site, and  $N_0=1$  at another site.

Statistical moments  $\mu^k$  ( $k=1,2,3,4$ ) and quantiles  $q_p$  ( $p=0.10, 0.20, \dots, 0.90$ ) are determined at each site. Regression equations are derived between  $\ln \mu^k$  and  $\ln A$  (Table 2), and  $\ln q_p$  and  $\ln A$  (Table 3).

TABLE 1 : Characteristics of flow gaging stations

Station no.	N (years)	N <sub>0</sub> (years)	A (km <sup>2</sup> )	D <sub>i</sub>
501	17	0	5675	1.18
509	33	0	902	1.25
510	24	0	3185	0.22
514	30	0	690	0.95
515	30	0	740	0.96
523	25	1	3272	1.37
524	22	0	176	0.98
525	19	4	64	0.92

TABLE 2 :: Power  $\beta$  of the relationship  $\mu_i^k \propto A_i^{\beta k}$ 

k	1	2	3	4
$\beta$	0.700	0.700	0.697	0.695

TABLE 3 : Power  $\alpha$  of the relationship  $q_{pi} \propto A_i^\alpha$ 

p	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$\alpha$	0.60	0.69	0.73	0.75	0.76	0.67	0.70	0.68	0.71

It is seen that  $\beta$  coefficient is practically constant such that  $\mu^k$  is proportional to  $A^{0.70k}$  (correlation coefficient  $R=0.75-0.78$ ).  $\alpha$  coefficient varies in a wider range with an average 0.70 for  $p=0.2-0.9$  ( $R=0.63-0.78$ ) indicating that  $q_p$  is proportional to  $A^{0.70}$  but  $\alpha=0.60$  for  $p=0.1$ . These results imply approximate simple scaling of low flows in the region.

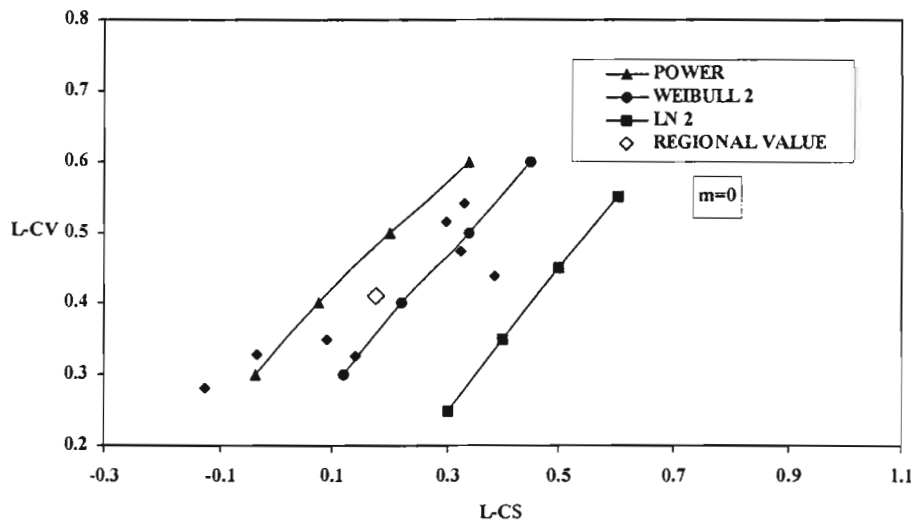


Fig. 2 L-C'

Fig. 2 : L-CV and L-CS values of the at-site data for  $m=0$ .

The discordancy analysis is performed to flag as discordant the sites of which the data stand out from those of the other sites. Discordancy measure  $D_i$  is computed at each site (Hosking and Wallis 1993). All  $D_i$



values are smaller than 2.14, critical value for 8 sites (Hosking and Wallis 1997) and can not be rejected as discordant by the criterion for discordancy (Table 1).

Zeros are discarded at sites with some zero observations, then the data at each site are made non-dimensional dividing by the mean.

L-moments of the data at each site are computed. L-variation coefficient L-CV and L-skewness coefficient L-CS of the at-site data are plotted in Fig.2. Weighted average point is also shown in the figure, weights being proportional to record lengths. L-CS versus L-CV relationships of the three probability distributions are shown in Fig.2. It is seen that the curve of LN2 is far from most of the data points, whereas W2 and P2 are almost equally close to the regional point. For this reason LN2 distribution is not considered in the rest of the study.

Next,  $LL_m$ -CV and  $LL_m$ -CS values are computed from the at-site data for  $m=1,2,3$  and 4 ( $LL_m$ -CV is the  $LL_m$ -variation coefficient and  $LL_m$ -CS is the  $LL_m$ -skewness coefficient) and plotted in Figs. 3-6, respectively. In these figures, regional weighted average point and curves of the W2 and P2 distributions are also shown.

It is seen from these figures that for  $m \geq 2$  data are better represented by P2 distribution and the regional point is almost on the curve of this distribution. P2 distribution seems to have a better fit to the data than W2 for higher values of  $m$  in light of the  $LL_m$ -moment diagrams.

Parameters of regional W2 and P2 distributions are estimated using Eqs.(6) and (7) on the basis of the regional weighted average  $LL_m$ -moments for  $m=0,1,2,3$  and 4. Results are given in Table 4. Parameter values do not change significantly for  $m \geq 2$ .

TABLE 4 : Parameters of the distributions estimated by  $LL_m$ -moments for various values of  $m$

	$m$	0	1	2	3	4
Weibull d.	$k$	1.32	1.22	1.15	1.10	1.07
	$\alpha$	1.09	1.11	1.17	1.23	1.29
Power d.	$c$	0.72	0.89	0.94	0.95	0.96
	$x_0$	2.38	1.97	1.84	1.80	1.80

Power distribution has an upper bound  $x_0$ . At some stations there are observations above this value. In such cases these points are omitted in testing the goodness of fit of P2. Number of such points,  $N_1$ , is shown in Table 5.  $N_1$  in general increases with  $m$  because of the decrease of  $x_0$  and increase of  $c$ .

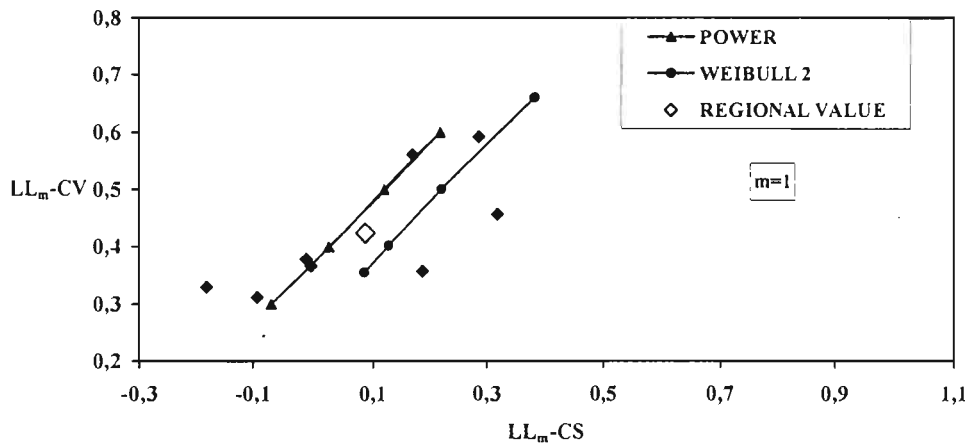


Fig. 3 :  $LL_m$ -CV and  $LL_m$ -CS values of the at-site data for  $m=1$ .

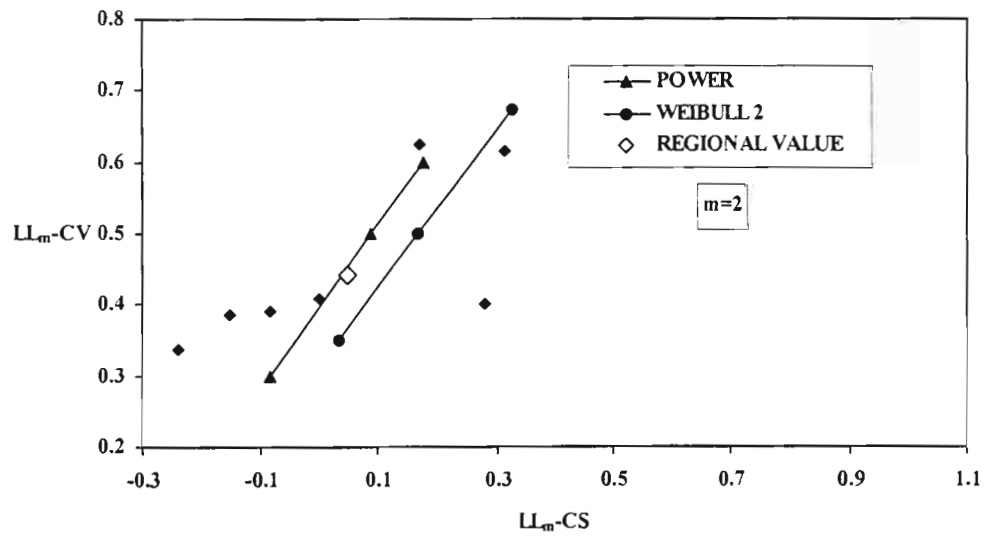


Fig. 4 :  $LL_m\text{-}CV$  and  $LL_m\text{-}CS$  values of the at-site data for  $m=2$ .

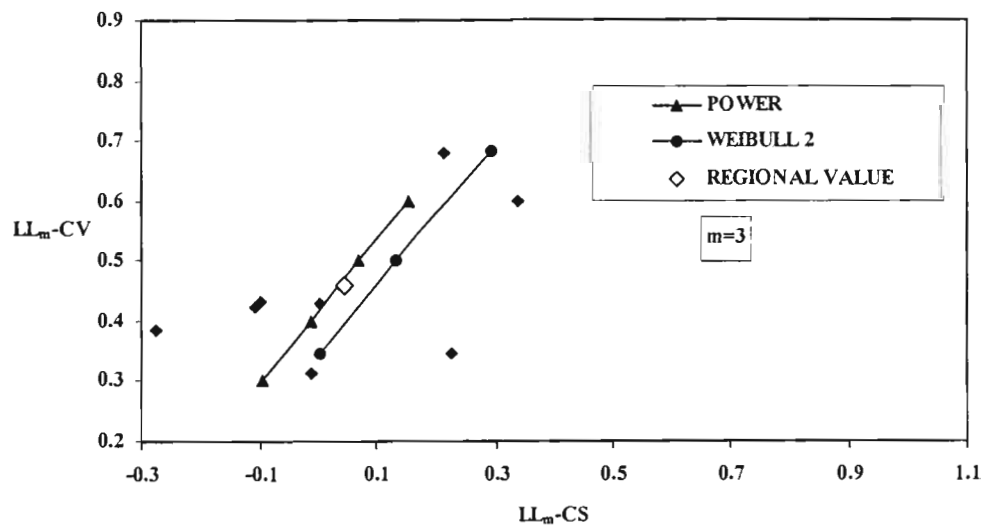


Fig. 5 :  $LL_m\text{-}CV$  and  $LL_m\text{-}CS$  values of the at-site data for  $m=3$ .

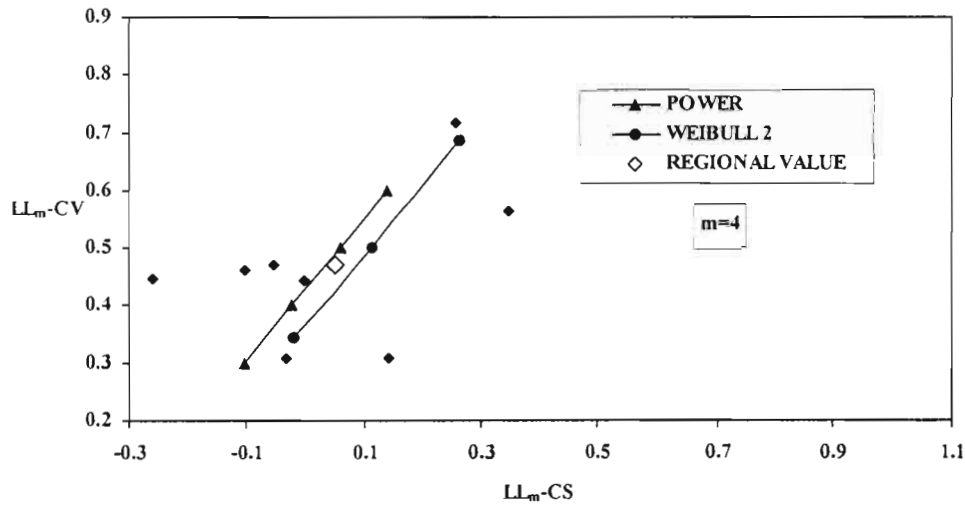


Fig. 6 :  $LL_m-CV$  and  $LL_m-CS$  values of the at-site data for  $m=4$ .

TABLE 5 :No. of observations above the upper bound  $x_0$  of P2 for various values of  $m$

Station no.	m				
	0	1	2	3	4
501	0	2	2	2	2
509	0	0	1	1	1
510	0	3	4	4	4
514	3	4	5	5	5
515	3	5	6	6	6
523	2	3	3	3	3
524	0	0	0	0	1
525	2	2	2	3	3

Goodness of fit of the regional W2 and P2 distributions to the at-site data is checked by the PPCC test. For W2 distribution critical values of the PPCC test are taken from Vogel and Kroll (1989) and for P2 distribution from Önöz and Bayazit (1998). Table 6 shows the highest level of significance  $\alpha$  at which the distribution passes the test. As stated before, PPCC statistics are independent of the method of parameter estimation for W2 distribution when a Weibull-type plotting position is used and therefore do not vary with  $m$ .

Goodness of fit of P2 distribution generally improves with the increase of  $m$  (with the exception of sites 515 and 525) but does not vary when  $m$  exceeds 2. P2 with parameters estimated by  $LL_2$ -moments has a better fit than W2 at 3 sites but the fit is poorer at 2 sites. In this case PPCC test is not very helpful in deciding which regional distribution has the best overall fit

Goodness of fit of the distributions is also checked by the method described before that is based on the differences between observed and predicted quantiles. This method makes it possible to evaluate the goodness of fit for the region as a whole. Bias and rmse of the differences are given in Table 7.

TABLE 6 : Levels of significance at which the distributions pass the PPCC test

Station no.	W2	P2				
		m=0	1	2	3	4
501	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
509	0.10	0.25	0.50	0.50	0.50	0.50
510	0.25	0.25	0.25	0.50	0.50	0.50
514	0.25	0.01	0.01	0.25	0.25	0.25
515	0.25	0.25	0.05	0.01	0.01	0.01
523	0.25	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
524	0.10	0.05	0.10	0.10	0.10	0.10
525	0.25	0.25	0.10	0.10	0.10	0.10

TABLE 7 : Bias and rmse of the differences between observed and predicted quantiles

m	W2					P2				
	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
Bias	0.016	0.016	-0.006	-0.034	-0.060	-0.018	-0.014	-0.002	0.004	-0.006
Rmse	0.035	0.036	0.052	0.087	0.121	0.102	0.037	0.018	0.019	0.026

It is interesting that the bias and rmse of the differences based on P2 distribution decrease with the increase of m up to m=2 and then start to increase again. This also holds for the bias of the differences based on W2 but their rmse increases with m. P2 distribution with parameters based on LL<sub>2</sub>-moments has both the minimum bias and minimum rmse.

On the basis of these results P2 distribution with parameters estimated by LL<sub>2</sub>-moments is chosen as the regional probability distribution:

$$F(x) = (x/1.84)^{0.94} \quad x \leq 1.84 \quad (8)$$

X denotes the annual 7-day minimum flow made non-dimensional dividing by the at-site mean. It should be noted that this distribution is fitted to the data below  $x_0=1.84$ . At a site where some of the observations are above this value ( $x > 1.84\mu_x$ )  $F(x)$  corresponding to a certain x should be computed as follows. In this case, Eq. (8) gives the conditional distribution  $F(x|x \leq x_0)$ . By the rule of conditional probability  $F(x)$  can be computed as

$$F(x) = \frac{N - N_1}{N} F(x|x \leq x_0) \quad (9)$$

where  $N_1$  is the number of observations above  $x_0$ .

On the other hand, at sites with zero observations Eq. (8) or Eq.(9) gives the conditional distribution  $F(x|x > 0)$ .  $F(x)$  can be determined as

$$F(x) = \frac{N_0}{N} + \frac{N - N_0}{N} F(x|x > 0) \quad (10)$$

## CONCLUSIONS

Regional analysis of low flows can be performed following the steps explained in the paper. Having identified a homogeneous region and discarded the discordant sites, a suitable probability distribution function is fitted to the data. Parameters of the distribution function are estimated by the regional weighted average L-moments or LL-moments. LL-moments give greater weight to the lower tail of the data.

The methodology is applied to the Gediz river basin in Turkey. Power distribution with LL-moments of order 2 has the best fit. It is discussed how the data above the upper bound and zero values must be treated in estimating the low flow quantiles.

In this paper, only 2-parameter probability distributions are considered. Similar studies can be carried out using 3-parameter distributions,

## REFERENCES

- DURRANS, S.R., and S.Tomic, Regionalization of low flow frequency estimates : an Alabama case study, *Water Resour. Bull.*, 32(1), 23-37, 1996.
- GUMBEL, E.J., *Statistics of Extremes*, 375 pp., Columbia University Press, New York and London, 1958.
- GUPTA, V.K., and E. WAYMIRE, Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions, *Jour. of Geophysical Res.*, 95(D3), 1999-2009, 1990.
- GUPTA, V.K., O.J. MESA, and D.R. DAWDY, Multiscaling theory of flood peaks: Regional quantile analysis, *Water Resour. Res.*, 30(12), 3405-3421, 1994.
- GUSTARD, A., and R.GROSS, Regional low flow studies, Chap.5 in *Flow Regimes from Experimental and Network Data (Friend)*, Institute of Hydrology, Wallingford, 1989.
- HOSKING, J.R.M. and J.R. WALLIS, Some statistics useful in regional frequency analysis, *Water Resour. Res.*, 29(2), 271-281, 1993.
- HOSKING, J.R.M. and J.R. WALLIS, *Regional frequency analysis*, IBM Research Division, T.J.Watson Research Center, Cambridge University Press 1997.
- ONoz, B. and M BAYAZIT, Power distribution for low stream flows, *Second National Hydrology Congress*, 1998.
- STEDINGER, J.L., R.M. VOGEL, and E. FOUTOULA-GEORGIOU, Frequency analysis of extreme events, Chap. 18 in *Handbook of Hydrology*, edited by D-R. Maidment, pp.18.1-18.66, McGraw Hill, 1993.
- VOGEL, R.M., and C.N.KROLL, Low-flow frequency analysis using probability-plot correlation coefficients, *J.Water Resour. Plann. Manage.Div. Am.Soc.Civ.Eng.*, 115(3), 338-357, 1989.
- VUKMIROVIC, V., J.MaLisic and D.PAVLOVIC, Some aspects of regional statistical analysis of low flows, *Friend Low Flows Expert Meeting*, Belgrade, 1998.

# STUDYING DROUGHTS AT A EUROPEAN SCALE

Demuth S. and Stahl K.

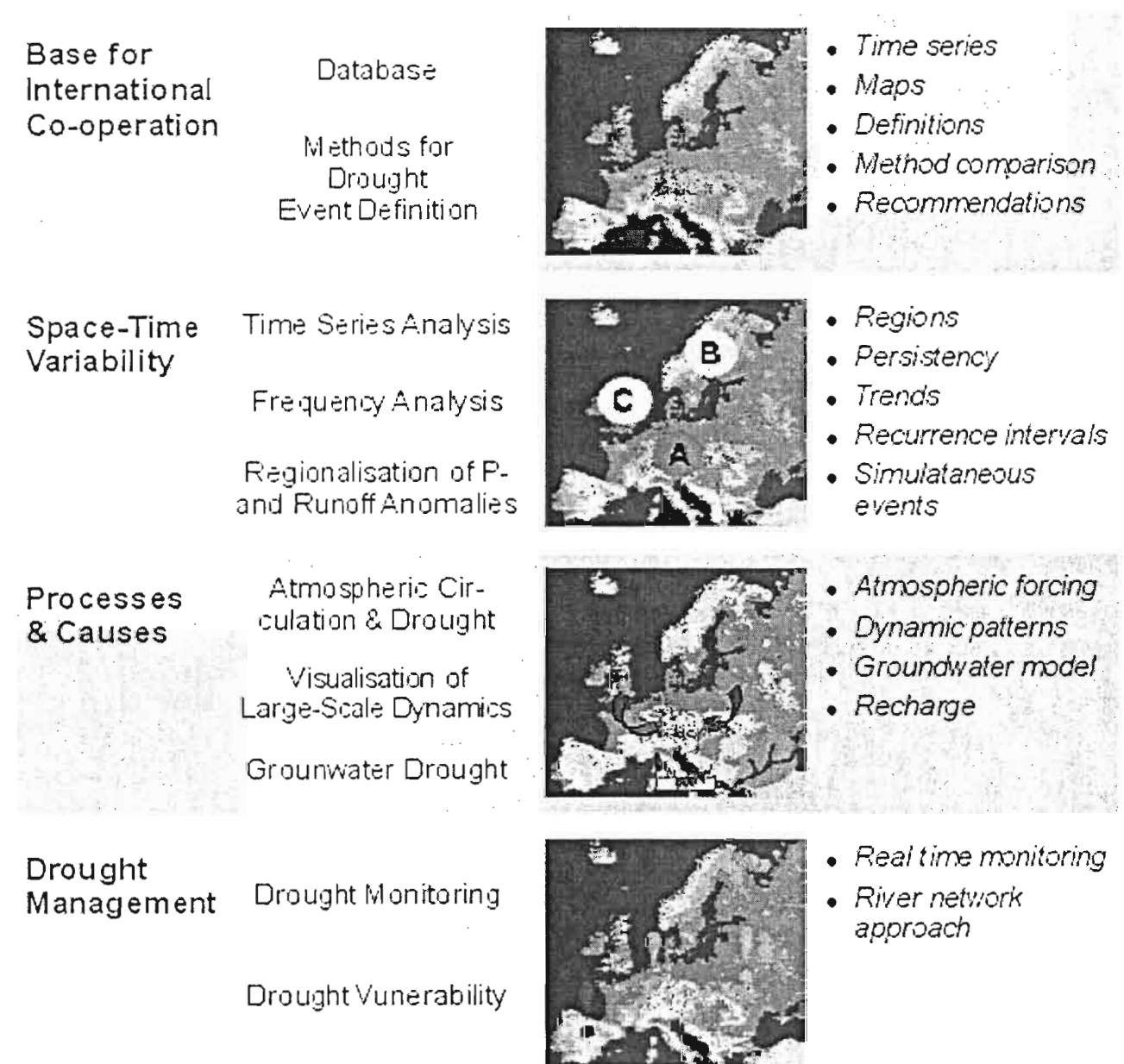
*Institute of Hydrology, University of Freiburg, 79098 Freiburg, Germany*

## INTRODUCTION

Since the demand for European water resources has increased in the past decades, future conflicts between human requirements (commercial, social and political) and ecological needs are likely to increase. These conflicts are most critical and intensify during severe and extensive droughts. Droughts as result of hydro-climatological conditions were long considered a hazard affecting mainly developing countries. Nevertheless, the public awareness has increased in the past years in the industrial countries especially with respect to the climate change issue predicting more extreme hydrological conditions. As a consequence the United States have established a National Drought Mitigation Centre advising governments at all levels in drought planning. In a recent study the socio-economic impact of droughts were summarised comparing the warning time, the duration, the frequency, the fatalities, the costs and losses and the spatial extent with similar figures for floods and hurricanes (National Drought Mitigation Centre, 1998). The costs of the worst recent drought in the USA (1988-89, \$ 39-40 billion) were in average more than twice the costs of the worst flood (1993, Mississippi valley, \$15-28 billion). These socio-economic costs underpin the demand for a preventive drought management. In the early nineties Europe has also experienced severe droughts resulting in significant economic and environmental costs, e.g. the damage in Spain (1992-1995) was estimated to several billion Euros (Garrido and Gómez-Ramos, 2000). Although several political initiatives have been launched at a pan-European scale, e.g. the 'Environmental Programme for Europe' and the 'Water Resources Framework Directive', the inauguration of a European Drought Mitigation Centre is still not considered necessary (EEA and UNEP 1997, EC 1998, Vogt and Somma, 2000). There is a lack of knowledge about drought characteristics, especially in a regional and pan-European perspective.

The ARIDE project (Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe) identifies and addresses some aspects of the drought problem. The ARIDE project is the first EC funded research programme analysing spatial and temporal drought characteristics based on precipitation, streamflow records and hydrogeological records at various scales (at site, regional and pan-European scale). For any drought study a consistent definition of a drought is important. Here the definition is related to stream flow data (daily data), meteorological data (monthly and annual) and groundwater data (recharge data and groundwater heads). The drought definition used in the ARIDE project is based on the threshold level method that is applicable to define meteorological droughts in terms of precipitation deficits as well as hydrological droughts in terms of streamflow and groundwater deficit. A comprehensive inventory of commonly applied definitions and indices can be found in Hisdal and Tallaksen (2000). However, both fixed and variable thresholds and different pooling procedures were applied depending on the purpose of the study.

The drought definition used in the research programme acts as a prerequisite for analysing various aspects of droughts such as processes causing droughts and space-time drought characteristics. The different drought definition methods are considered to be appropriate to analyse droughts at different regional scales. With respect to the inauguration of a European Drought Watch System regionalisation and visualisation tools are important. A prototype of a real-time drought monitoring system was established based on modern Teleconnection tools and online data retrieval facilities. Figure 1 gives a comprehensive overview about the different research aspects of the ARIDE project. The project was a joint effort of scientists from the Northern European (NE) FRIEND (Flow Regimes from International Network Data) Low Flow Group (Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, UK, Department of Geophysics, University of Oslo, Norway, Sub-Department of Water Resources, University of Wageningen, The Netherlands and the Institute of Hydrology, University of Freiburg, Germany), and scientists from national agencies in Spain (CEDEX) and Portugal (INAG).



*Fig. 1 : ARIDE Project Research Programme*

The paper highlights only a few aspects of the ARIDE research programme that are related to database issues, time series analysis, the impact of atmospheric circulation patterns on droughts and possible implementation of the results with respect to the inauguration of a European Drought Watch Centre.

## DATABASE

The ARIDE project benefited greatly from the European Water Archive (EWA), a major achievement of the FRIEND project. The EWA contains long-term daily flow data and catchment information from over 5000 river gauging stations in Europe (Rees and Demuth, 2000). Today, the European Water Archive (EWA) is considered as one of the most comprehensive hydrological data set in the world, serving over 100 research organisations in 29 European countries. The geographical extent of the database includes northern, western and Eastern Europe with most of the stations located in France, Germany, Norway, Russia and the UK. However, the length of the time series varies largely. For example, the record length for many stations in France is not well suited to carry out a regional comparative time series analysis to investigate the spatial extent and the frequency and severity of extreme droughts at a pan-European scale.

To accomplish the dataset for drought monitoring and visualisation which needs near real-time data, support is given by the MED-HYCOS project since it provides the required data (Morell, 1999). The Mediterranean Hydrological Cycle Observing System (MED-HYCOS PRC) is an EC funded project including national hydrological services from Bulgaria, France, Greece, Italy, Portugal, Romania, Slovenia, Spain, Turkey, Ukraine and Yugoslavia. They have established a network of data collecting platforms located on the main rivers in Europe. The data are transferred by Tele-connection via METEOSAT. The regional database is connected to the World Wide Web of the Internet.

Data from meteorological stations have been collected from national and international data sources. They include time-series of precipitation, gridded rainfall with monthly and daily time resolution. Temperature and other climate variables such as humidity, wind speed and solar radiation are collected for selected basins. Precipitation series have been taken from the Global Historical Climatology Network (GHCN) and the North Atlantic Climatological Data Set (NACD). For the MEDALUS stations gridded rainfall is available from the World Climate Disk (CRU). A centrally held meteorological database does not exist on a pan-European scale like the European Water Archive for hydrological data. Large scale synoptic data for Europe (Gridded Mean Sea Level Pressure, NAOI – Northern Atlantic Oscillation Index, GWL-European Grosswetterlagen, Lamb's Weather Types and Jenkinson's Weather Types) were collected from International and National Meteorological Services.

The thematic database like the meteorological database is not a centrally held common format database. It is a collection of datasets from different sources. The data collection includes data in GIS format, digital maps, river network, elevation etc. for basin characteristic derivation and CORINE land cover.

## TIME SERIES ANALYSIS

Since most of the research work in the ARIDE project was based on time series data an initial time series analysis has been carried out. In general, hydrologic time series exhibit trends, shifts or jumps, seasonality, persistency, and non-normality (Salas, 1993). Time series analysis may reveal important information about the history and characteristics of the data. In the ARIDE project, changes in streamflow series are explored using trend analysis and inter-annual persistency was studied using a run test.

With the projected global temperature increase, scientists generally agree that the global hydrological cycle will intensify and suggest that the extremes of droughts and floods will become more common (Watson *et al.*, 1998). Therefore, the trend study was carried out on the long streamflow series to assess the degree of possible changes (Hisdal *et al.*, 2001). Since the choice of periods used for the different regional drought studies are based on the data available, it was also important to assess how different period effect the drought characteristics, e. g. sub-periods compared to longer periods. The pan-European trend analysis reveals that despite several reports on recent droughts in Europe, there is no clear indication that streamflow drought conditions in Europe have generally become more severe or frequent in the time periods studied. However, based on a fixed period, clear regional patterns are found (Figure 2). These trends can to a large extent be linked to changes in precipitation patterns and artificial influences in the catchments. The importance of the temporal aspect when testing for trends could be clearly illustrated (Hisdal *et al.*, 2001). What is seen as an increased frequency or severity based on a 'short' period of observations, might turn out to be a part of a long term fluctuation and cannot be seen as evidence of human-induced climate change nor be used as a basis for drought prediction into the future.



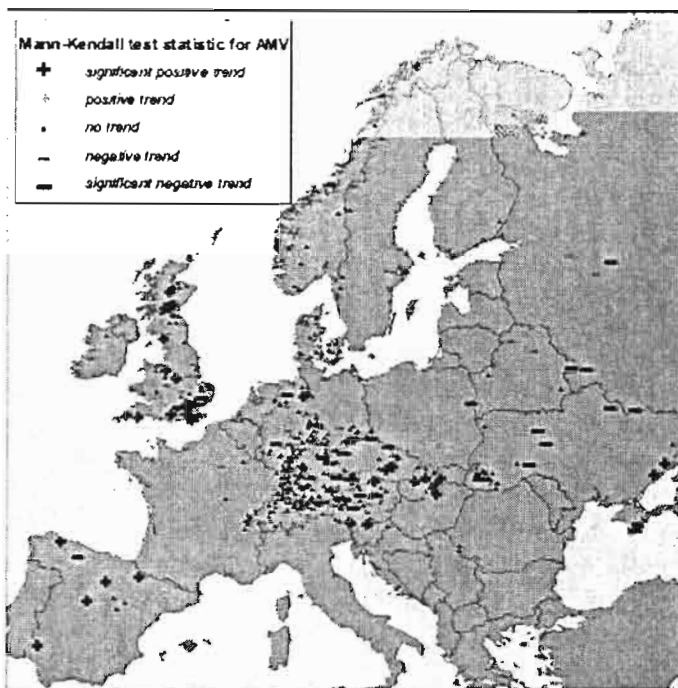


Fig. 2 : Results of the Mann-Kendall Test for trend detection in the 1962-90 series of the drought parameter AMV (Annual Maximum Deficit Volumes).

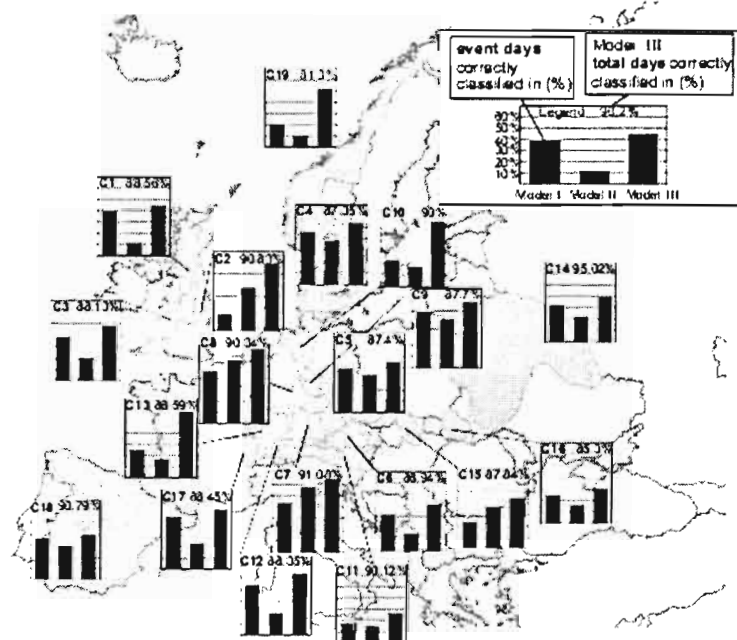
The persistency test carried out on the same pan-European data set for the period 1962-90 showed a tendency for less persistency in mountainous regions as compared to lowland areas, with exceptions of UK and some local particularities (Demuth & Stahl, 2001). The regional pattern suggested inter-annual persistency for groundwater catchments. Due to lack of information on the basin properties, this aspect was not further analysed. The results suggested that both persistency and trend are strongly influenced by the records selected for analysis and by the drought parameters studied.

## ATMOSPHERIC CIRCULATION AND DROUGHT

Drought causing processes are difficult to capture in a model, as drought is a slowly developing hydrological phenomenon, dependent on various factors. An atmospheric drought signal (dry weather period) causes a regional precipitation deficit, which will then invoke a streamflow decrease and - depending on the basin properties and groundwater reservoirs - will eventually result in a streamflow drought. This process description suggests the investigation of how the atmospheric drought signal is passed on to the streamflow component of the hydrological cycle. The concept of applying a varying threshold level for the derivation of seasonal streamflow deficiency periods was introduced, thoroughly evaluated and finally found suitable to investigate the link to atmospheric circulation (Hisdal *et al.*, 2001). In a first step, the dynamics of selected drought events as visualised with the electronic atlas ElectrA are compared with the mean sea level pressure situation over Europe. On the ARIDE website some more examples of the animated visualisation of the MSL and streamflow conditions across Europe can be found (<http://www.uni-freiburg.de/hydrology/forsch/aride/>). The technique illustrates a high potential for an interactive user-defined application.

One possibility for downscaling large-scale GCM output to regional scale hydrology is to determine a statistical relationship between synoptic meteorological situations and hydro-climatic parameters by correlation or regression analyses of historic series (e.g. Redmont and Koch, (1991), Piechota and Dracup (1996), Shorthouse and Arnell (1997)). Most attempts to predict drought are currently based on the statistical relationship to climate variables. Classified atmospheric circulation patterns (CPs) and circulation indices have proved to be a valuable tool to establish a direct statistical link with hydrologic parameters and therefore this approach was followed in the ARIDE project (Demuth & Stahl, 2001). As streamflow deficit and drought are regional phenomena, stations with simultaneous drought occurrence were grouped by cluster analysis and the streamflow deficit signal was aggregated to the regional scale. The regional series were then used to investigate the relationship to atmospheric circulation patterns (Stahl and Demuth, 1999). A logistic

regression analysis predicting the regional drought indices on the basis of lagged CP frequencies was performed for the European regions (Stahl & Demuth, 2001). Figure 3 summarises the results.



**Fig. 3 :** Result of the Logistic Regression Models linking streamflow deficiency to lagged atmospheric circulation pattern frequencies.

The percentage of the correctly classified days successfully ranges from 88% to 95% for the model with daily CP-groups and frequencies lagged at 30 days and 150 days. The best fit was obtained for regions in northern Germany and south west UK with more than 60% of the event days classified correctly. The results for model I (30-day lagged CPs only) and model II (150-day lagged CPs only) indicate the lag relevant for a drought to develop. While, the short term CP occurrence explains a higher percentage of the event days of the Scottish region, the long-term lag explains a greater part in southeast and east UK. For most clusters, these results are consistent with the hydrological response that can be expected from the governing geological and climatological characteristics.

The regression functions are the basis to assess the influence of climate variability, simulated by CP frequency changes, on drought. Finally, three types of regional series, derived from different research areas in the ARIDE project were subjected to a correlation analysis with the NAOI. The results are documented in the Final Report to the EU (Demuth & Stahl, 2001).

## EUROPEAN DROUGHT WATCH SYSTEM

For a sustainable water resources management, knowledge on low flows and droughts is not only important at a pan-European level (e.g. within the framework directives) for political decision making, at a regional level (e.g. for international river basin management), at a national level (e.g. for emergency purposes) but also at a management units (e.g. along the river network). For many water related sectors e.g. water supply, tourism, agriculture, environment, navigation and energy, the knowledge of the vulnerability of a river system towards low flow or drought conditions are a premise for decision makers. Therefore drought research should not only be restricted to a better understanding of the processes but also on the development of early warning systems including monitoring and forecasting facilities. Within the ARIDE project, different operational drought prediction approaches were considered. One employs a regionalisation technique that considers the physical characteristics of the upstream catchment to determine the elapsed time between the onset of dry weather and the drought condition being attained at any point along a river network (River Network Model) (Schreiber and Demuth, 1994, Demuth *et al.*, 2000). Although this generic method could ultimately be applied anywhere in Europe, in the ARIDE project, it was illustrated for a region of southern Germany. Another approach demonstrates the possibility of developing a pan-European drought monitoring system. The pilot application developed at CEH Wallingford tracks, in near-real-time, the flows at selected gauging stations across Europe and, thus, provide an early warning of droughts (Rees & Gustard,

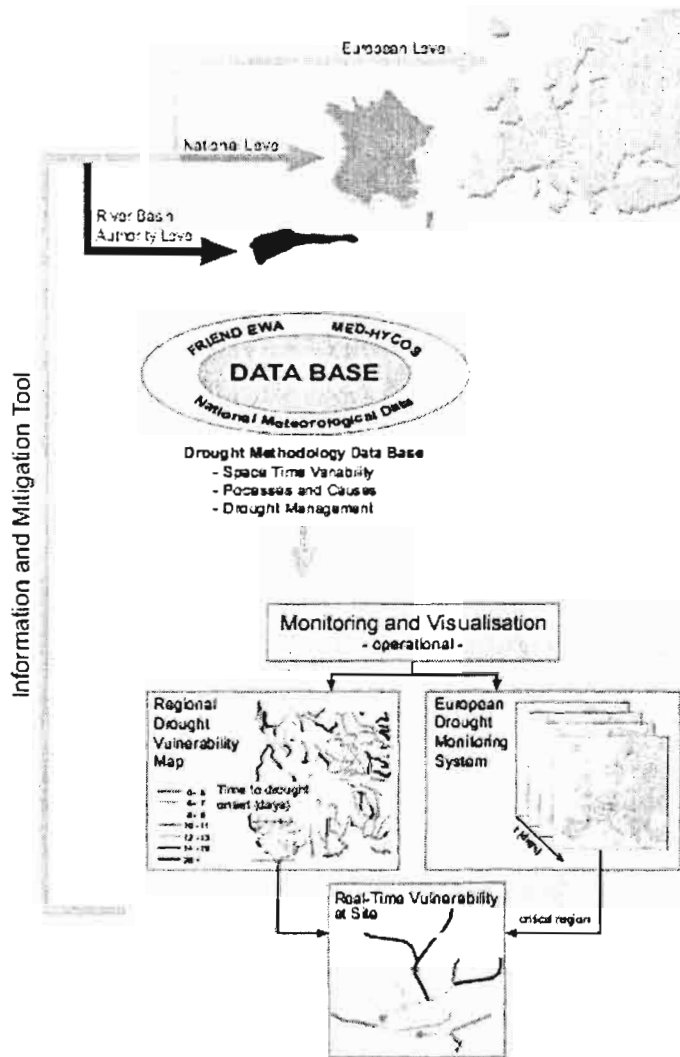
2001). The combined river network approaches of real time information and regionalised drought characteristics are seen as an appropriate tool to be implemented in a European Drought Watch System, which can further be accomplished by many other results and applications developed in the ARIDE project.

The characterisation of the dynamic development of historic drought events, for instance, helps to predict how drought conditions might spread during future events. This would improve early warning and mitigation of droughts and lead to a better management of integrated water resources during prolonged low flows. Mapping, or visualising, the spatial distribution of the flow deficit at each time step is therefore crucial if the dynamics of drought development is to be fully understood. The visualisation software, called ElectrA, developed by Zaidman and Rees (2000), essentially functions as an 'electronic atlas' showing, on-screen, the distribution of drought conditions across Europe for each time step. ElectrA also includes a facility for displaying a series of images as an animation or 'video'. The chronological sequence of drought development in an easily understandable form, as animations of colour coded maps (red colours representing areas where flows were low and blue colours representing regions where flows were high and so on). Flow conditions were expressed in terms of daily flow exceedance or as a standardised departure from the mean daily flow ('flow anomaly') derived at daily time step for the period from 1960 to 1995. More details on the methodology are given in Zaidman and Rees (2000). The ElectrA application was used to examine changes in the flow conditions across Europe during a number of periods in which droughts are known to have occurred, in order to look at the development of different streamflow droughts, and to qualify the repeatability of spatial patterns from year to year. Although similar visualisation techniques are used to portray movement of rainfall on TV weather bulletins, few applications available to the water industry are capable of representing flow data in a similar way, either on a regional or pan-European scale.

Together with drought frequency analyses and drought distribution models estimating the recurrence intervals of droughts at a regional scale and the regionalisation procedure displaying drought vulnerability within a river network, drought information is given with respect to the directional tendency or the rate of growth and intensity. This will be of immediate interest to decision and policy makers at various levels (river basin, national, EU), which are responsible for water resources planning and drought management. The application of the visualisation tool and the regionalisation procedure help to adjust existing drought mitigation plans and as result minimise the impact of a repeated occurrence.

However, it is considered that the visualisation software could ultimately be used more operationally as an integral part of a Europe-wide near-real-time drought monitoring system. Figure 4 illustrates how a European drought watch system could form an application tool, which can for instance be used to decide whether drought warning, action plans etc. should be executed in particular regions: A critical region, e.g. orange colours (Q60) can be identified on the European drought monitoring system. For this critical region, the respective regional map with the drought vulnerability values can then be consulted to find out the time to drought onset under prevailing dry weather conditions. If both methods were included in one software tool, it might be possible to simultaneously display the actual condition and the expected time of recession to the drought threshold (real-time vulnerability at site).

## European Drought Watch System



*Fig. 4 : A European Drought Watch System*

## CONCLUSION

Research in the ARIDE project covered different aspects of drought at the pan-European scale. The European trend analysis shows no clear evidence that streamflow droughts have in general become more frequent or severe. It was found that in general they strongly depend on the period selected and the drought definition itself. The link of drought to atmospheric circulation patterns was studied in detail and revealed important information useful for future drought forecasting and the estimation of the impact of climate variability on drought. A pilot near-real-time drought monitoring system visualising current drought conditions across Europe could be established. In a critical situation, animation sequences could be provided using the most up-to-date data. The drought atlas Elektra can be used to look at similar events in the past and display the time series of individual rivers. Information on the present drought's severity and extent could be given as well as forecasts for its maximum extent, severity and duration. The combination of all these components (e. g. monitoring system, visualisation software and river network approach) will allow

assessing the drought risk at any day and improving the drought management possibilities. To implement such a system, many non-technical issues would need to be resolved. Nevertheless, the pilot real-time monitoring system did prove, with the successful transfer of data from a variety of disparate sources, that such a tool is technically feasible. If it ever came to fruition, a European drought monitoring system, having real-time access to a dense network of representative gauging stations throughout Europe, could benefit from many of the tools and methods developed during this ARIDE project. The work conducted within ARIDE research programme represents an important first step towards delivering such much-needed tools to the European water industry. However, a considerable amount of research and development is needed to implement these tools in a European Drought Watch System.

## REFERENCES

- DEMUTH, S. & SCHREIBER, P. (1994) Studying storage behaviour using an operational recession method (2nd Int. Conf. on FRIEND, Braunschweig, 11-15 October 1993), 51-59. IAHS Publ. no. 221.
- DEMUTH, S & STAHL, K (eds) (2001) ARIDE Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe. Final Report to the European Union ENV-CT 97 -0553. Institute of Hydrology, University of Freiburg. Germany.
- DEMUTH, S., LEHNER, B., STAHL, K. (2000) Assessment of the vulnerability of a river system to drought. In: *Drought and Drought Mitigation in Europe* (ed. by J.V. Vogt and F. Somma), 209-219. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- EEA and UNEP-European Environment Agency and United Nations Environment Programme (1997) Water Stress in Europe-Can the Challenge be Met? Copenhagen and Chatelaine.
- GARRIDO, A. and Gómez-Ramos, A. (2000) Socio-Economic Aspects of Droughts. In: *Drought and Drought Mitigation in Europe* (ed. by J.V. Vogt and F. Somma), 197-207. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- HISDAL, H. & TALLAKSEN, L.M. (eds.) (2000) Drought event definition. *ARIDE Tech. Report no. 6*. UiO, Oslo, Norway.
- HISDAL, H., STAHL, K., TALLAKSEN, L.M. & DEMUTH, S. (2001) Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology* (in press).
- MORELL, M. (1999) MED-HYCOS: A tool for water resources assessment and management in the Mediterranean. In: *Proc. Int. Conf. on Quality, Management and Availability of Data for Hydrology and Water Resources Management*, Koblenz, 22-26 March, 1999. 313-316.
- National Drought Mitigation Center (1998) <http://enso.unl.edu/ndmc/impacts/compare.htm>.
- PIECHOTA, T.C. & DRACUP, J.A. (1996) Drought and regional hydrologic variation in the United States: Associations with the El Niño-Southern Oscillation. *Water Res. Res.* **32**, 1359-1373.
- REDMONT, K.T. & KOCH, R.W. (1991) Surface climate and streamflow variability in the Western United States and their relationship to large-scale circulation indices. *Water Res. Res.* **27**, 2381-2399.
- REES, G. & GUSTARD, A. (2001) Near-real-time monitoring of droughts in Europe. In: Demuth, S & Stahl, K (eds) (2001) ARIDE Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe. Final Report to the European Union ENV-CT 97 -0553. Institute of Hydrology, University of Freiburg. Germany.
- REES, H.G. & DEMUTH, S. (2000) The application of modern information system technology in the European FRIEND project. *Wasser & Boden* **52**(3), 9-13.
- SALAS, J.D. (1993) Analysis and modelling of hydrologic time series. In: *Handbook of Hydrology*. (ed. by D.R. Maidment). McGraw-Hill, New York, USA.
- SCHREIBER, P. & DEMUTH, S. (1997) Regionalisation of low flows in south west Germany. *Hydrol. Sci. J.* **42** (6), 845-858.
- SHORTHOUSE, C.A. & ARNELL, N.W. (1997) Spatial and temporal variability in European river flows and the Northern Atlantic Oscillation. In: *FRIEND'97-Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management* (ed. by A. Gustard, S. Blazkova, M. Brilly, S. Demuth, J. Dixon, H. van Lanen, C. Llasat, S. Mkhani & E. Servat), 77-85. IAHS Publ. no. 246.
- STAHL & DEMUTH (2001) Atmospheric Circulation and Drought. In: Demuth, S & Stahl, K (eds) (2001) *ARIDE Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe. Final Report to the European Union ENV-CT 97 -0553*. Institute of Hydrology, University of Freiburg. Germany.
- STAHL, K. & DEMUTH, S. (1999a) Linking streamflow drought to the occurrence of atmospheric circulation patterns. *Hydrol. Sci. J.* **44**(3), 467-482.
- VOGT, J.V. & SOMMA, F. (2000) Conclusions and recommendations. In: *Drought and Drought Mitigation in Europe* (ed. by J.V. Vogt and F. Somma), 293-314. Advances in Natural and Technological Hazards Research, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- WATSON, R.T., ZINYOWERA, M.C. & MOSS, R.H. (eds.) (1998) *The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability*. IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- ZAIDMAN, M.D. & REES, H.G. (2000) Spatial patterns of streamflow drought in Western Europe 1960-1995. *ARIDE Tech. Report no. 8*. CEH, Wallingford, UK.

# EVALUATION OF REGIONAL DROUGHTS IN EUROPE

Santos M.J., Veríssimo R., Fernandes S., Orlando M. & Rodrigues R.

*INAG-Portuguese Institute for Water, Av. Almirante Gago Coutinho 30, 1049-066 Lisboa PORTUGAL*

## ABSTRACT

A regional model for drought analysis was applied to Western Europe. This methodology enables the analysis of the spatial distribution of these events and associated risk of their occurrence, expressed as the probability of each event being exceeded. The application of the regional model to large areas of Europe, comprising coastal and inland areas as well as mountainous regions and plains, is one of the activities of the ARIDE project (Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe).

The regional model application was performed for annual precipitation on the Western Europe. Meteorological drought was evaluated on twelve defined affinity regions. Different rainfall sample sizes were tested and larger series use was mandatory for an accurate evaluation of droughts in Europe.

## INTRODUCTION

Droughts are extreme events characterised by persistency in time and large areal spread effects. Methodologies that incorporate the evaluation of droughts areal distribution lead to a more comprehensive study of this phenomenon. The application of a regional model to regional drought evaluation in Europe considers the association of elemental areas of the region to each data series. Regional drought spread is obtained through the adjacent area selection criteria, that enables the discrimination of relevant drought areas from spottiness incidence (disperse ones). Generation techniques are used to calculate drought return periods, which result from the development of severity-area-frequency curves. These curves allow the evaluation of regional drought return period (Santos 1996, Henriques & Santos 1998).

The evaluation of drought in large scale assumes the application of the same method in data sets with similar characteristics. For this a common time step (model's time resolution) and sample period must be defined, based on the characteristics of the time series. In the same way homogeneous regions are defined for the model application.

The analysis of drought involves the use of large data sets. For some areas precipitation data was not available for more than 35 years. As a consequence the global analysis has a common period ranging from 1951/52 to 1985/86, defined by the shorter series of the areas in Southeastern Europe. Once data was available since 1900 for some of the Western Europe's regions it was possible to infer on the effects of using shorter periods in drought analysis.

## EVALUATION OF REGIONAL DROUGHT OCCURRENCE PROBABILITY

Drought severity in the affected areas obtained from the simulated series is used to construct severity-area-frequency curves. Drought severity in the affected areas obtained from the historical records is compared to the severity-area-frequency curves and drought return period is further evaluated.

The drought model application in each European region considers the following major steps:

- Calculation of drought severity and drought areas in each time period;
- Simulation of precipitation longer series for the calculation of severity and drought areas;
- Determination of the parameters of the severity-area-frequency curves using droughts calculated from simulations runs;
- Comparison between the severity-area-frequency curves and the historical areal evolution of drought severity so as to allow the attribution of recurrence intervals to each observed regional drought.

An example of the evaluation of the drought exceptionality in terms of its regional spread can be seen in Figure 1. Close to the drought nucleus (where the drought cluster burst and evolves) drought severity assumes higher values. Severity calculated in larger areas of the regions is lower since it accumulates the value of the variable weighted by the area. The final objective of the model application is to compare drought with the severity-area-frequency curves and to associate the return period of regional drought. In Figure 5.2 the regional drought observed in 74/75 is associated to a return period of about 25 years.

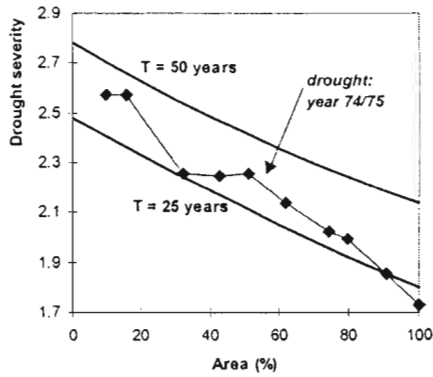


Fig. 1 : Evaluation of the return period  $T$  of a regional drought event with the regional distribution model.

## PRECIPITATION OVER WESTERN EUROPE

The evaluation of drought's incidence in large-scale areas assumes the application of the same method in data sets with similar characteristics. For this a common time step and sample period must be defined. Drought evaluation is often approached by using different time steps for different climatic regions, and different applied methods, from month to year and even multiple years. However a large-scale analysis of drought must consider the same assumptions for all the area to make possible temporal and spatial inter comparisons.

Since the common statistical models used for drought studies are valid only for homogeneous records, heterogeneity testing is indispensable. The application of the regional drought distribution model assumes the precipitation series homogeneity and data series must have the same length within each region. Operations performed include in a first step the heterogeneity analysis and in a last step the missing values calculation within each defined period (Santos & Henriques 1999). A total of 279 series was finally used for Western Europe.

The integration of precipitation totals in one year should consider the end (or the beginning) of the rainy season. Since regional drought comparison is to be undertaken, a common year period must be used. Comparing within the year variation of the long-term monthly mean precipitation (calculated since 1900) for several cities in Europe, the best 12-month period to aggregate monthly precipitation is reached, from October to September (Santos & Henriques 1999).

The applied model relates elemental areas of the region with recorded data series of precipitation. The regional drought area is obtained through weighting adjacent areas using a neighbouring selection criteria, that highlights the relevant drought areas from the disperse ones. The regional model considers the normal distribution of the transformed precipitation. The initial standard precipitation used in the model is given by:

$$W_{i,j} = \frac{P_{i,j}^{\lambda} - 1}{\lambda}; \quad Z_{i,j} = \frac{W_{i,j} - \mu_i}{\sigma_i}$$

where  $P_{i,j}$  is the precipitation in period  $j$  and in location  $i$ ,  $\lambda$  is the Box-Cox parameter for skewness correction and  $\mu_i$  and  $\sigma_i$  are the mean and the standard variation. One assumes that the parameter  $\lambda$  is constant throughout each region. The regional Box-Cox parameter is obtained by:

$$\lambda = \left[ \prod_{i=1}^{NrSeries} \lambda_i \right]^{1/NrSeries}$$

Regions were delimited by the classification of serial parameters using the Thiessen polygon method. The verification of the goodness-of-fit of the normal distribution to the transformed series (using a regional parameter) and non-transformed ones is performed using several tests. When the transformation does not improve the application of the model, the regional  $\lambda$  is considered to be equal to 1. The main aspects involved in the definition of regions are dependent on the model used (SANTOS et. al. 1999).



In Figure 2 are presented the European regions considered for the model application, the availability of data and transformed parameters used. Twelve regions are considered for drought calculations.

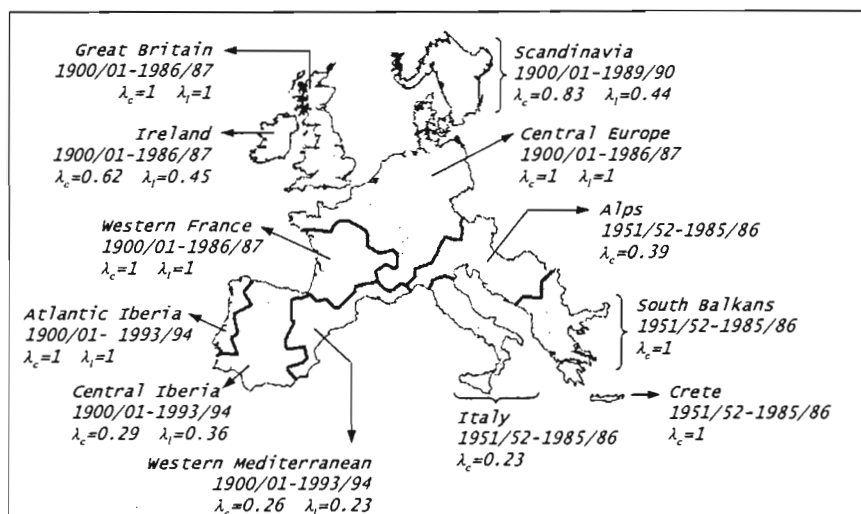


Fig. 2 : European regions for the application of the regional drought distribution model application to the annual precipitation, data available and Box-Cox parameter for the longer ( $\lambda_l$ ) and the common period ( $\lambda_c$ ).

## EXCEPTIONALITY OF REGIONAL DROUGHTS

The exceptionality of regional droughts is obtained comparing the severity-area-frequency curves with the historical ones. The example of the water year 1975/76 is presented in Figure 3 for Scandinavia and Central Iberia. The drought verified in 1975/76 was associated to a return period higher 100 years in Scandinavia, while for Central Iberia drought was associated to a return period lower than 5 years. Droughts were classified in this way and a synthesis of the whole drought years obtained.

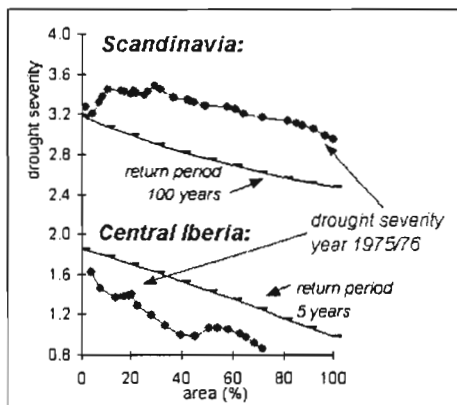


Fig. 3 : Evaluation of regional drought exceptionality in Scandinavia and Central Iberia for 1975/76.

Globally, within the common period 1951/52 to 1985/86, only the year 1959/60 was characterised by neglected drought areas. Return periods higher than 25 years were obtained for:

- Alps and South Balkans in 1951/52;
- Central Iberia in 1952/53 and 1953/54;
- Central Europe, Crete, Great Britain and Ireland in 1958/59;
- Central Europe in 1963/64;
- Crete in 1969/70;
- Alps in 1970/71;
- Central Europe, Great Britain, Ireland and Scandinavia in 1975/76; and
- South Balkans in 1984/85.



## EVALUATION OF DROUGHT USING LARGER DATA-SETS

As already mentioned, the area under analysis is the Western part of the European Continent. An average drought area of about 40% of the total ( $\sim 1100 \times 10^3 \text{ km}^2$ ) is obtained in the common period from 1951/52 to 1985/86. Drought affected more than half of the global area in 1953/54, 1956/57, 1958/59, 1963/64, 1971/72, 1972/73, 1973/74, 1975/76 and 1984/85. The first part of the 70's decade was very important to drought characterisation: around 80% of the total western Europe's area was affected by drought in 1972/73 and 1975/76. In these two years some southern areas were not affected by drought. The areas under drought are slightly larger when the common-shorter period of analysis is used. In some of the years, namely 53/54, 61/62, 68/69 and 85/86 the differences reached 10% or more (Figure 4).

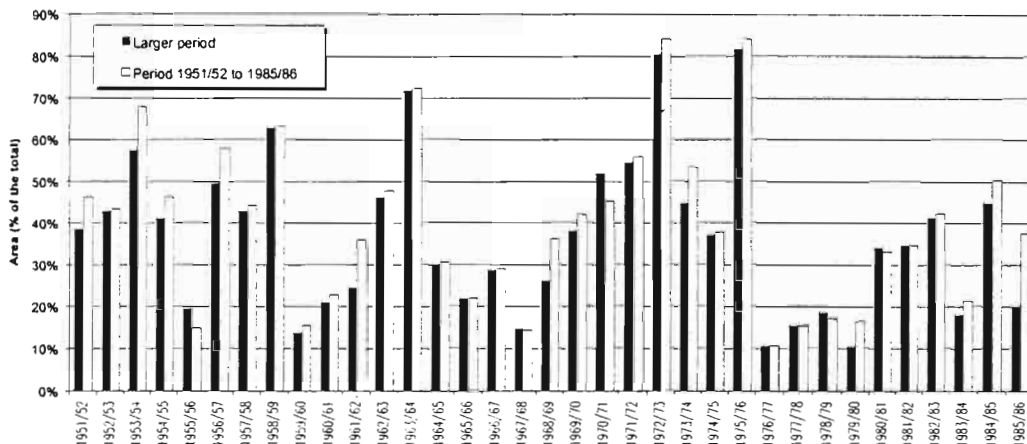


Fig. 4 : Comparison between the drought affected areas in Europe using the different periods.

Globally, results revealed that the total area of the regions was affected by drought in about 20% of the years. Regional drought's return period close to 100 years was observed in Central Europe 20/21, Central Iberia 44/45, Great Britain 58/59 and 75/76, Scandinavia 46/47 and 75/76, and Western France 48/49. In this row of events, several are outside the common period used. For this reason, one can expect to have a much better global characterisation of drought when a longer data set is used.

The example for the drought of 1944/45 in Central Iberia is presented in Figure 5. This drought was one of the most extreme in this region during the present century. However, the use of the sample period 51/52 85/86 is not long enough and does not possess the variability to allow the selection of droughts with return periods higher than 50 years, what naturally can lead one to erroneously infer on the most extremes events.

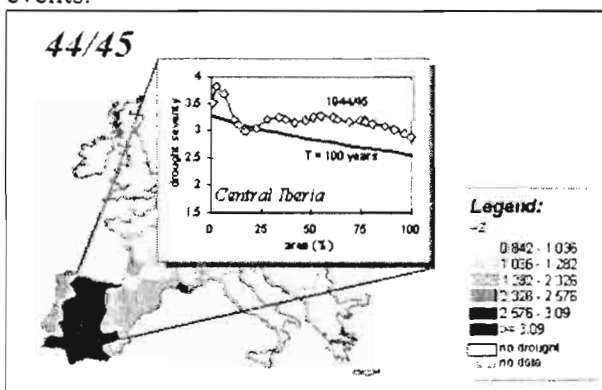


Fig. 5 : Drought spread and drought risk in Central Iberia (water year 1944/45).

The number of sequential droughts and the return periods associated are resumed in Table 1, for longer series and shorter ones (35 years of data).

TABLE 1 – Sequential droughts using different series length

REGION	LONGER PERIOD ~90 years		SHORTER-COMMON PERIOD 35 years 1951/52-85/86	
	DROUGHT (total area)	Return period (total area)	DROUGHT (total area)	Return period (total area)
<i>Alps</i>	No data	No data	Beginning 1981/82 – 2 years	11 years
<i>Atlantic Iberia</i>	Beginning 1943/44 – 2 years	58 years		
	Beginning 1948/49 – 2 years	22 years		
	Not sequential	Not sequential	Beginning 1952/53 – 2 years	20 years
<i>Central Europe</i>	Beginning 1932/33 – 2 years	35 years		
	Beginning 1942/43 – 2 years	21 years		
	Not sequential	Not sequential	Beginning 1970/71 – 3 years	74 years
<i>Central Iberia</i>	Beginning 1943/44 – 2 years	388 years		
	Beginning 1948/49 – 2 years	32 years		
	Beginning 1952/53 – 2 years	90 years	Beginning 1952/53 – 2 years	100 years
	Beginning 1956/57 – 2 years	14 years	Beginning 1956/57 – 2 years	16 years
	Beginning 1980/81 – 3 years	149 years	Beginning 1980/81 – 3 years	175 years
<i>Crete</i>	No data	No data	Beginning 1957/58 – 2 years	51 years
<i>Great Britain</i>	Beginning 1962/63 – 2 years	33 years	Beginning 1962/63 – 2 years	27 years
	Beginning 1971/72 – 2 years	15 years	Beginning 1971/72 – 2 years	12 years
<i>Ireland</i>	Beginning 1904/05 – 2 years	57 years		
	Beginning 1932/33 – 2 years	36 years		
	Beginning 1951/52 – 2 years	21 years		
	Beginning 1970/71 – 2 years	37 years	Beginning 1970/71 – 2 years	19 years
	Beginning 1974/75 – 2 years	273 years	Beginning 1974/75 – 2 years	90 years
<i>Italy</i>	No data	No data	Beginning 1969/70 – 2 years	15 years
<i>Scandinavia</i>	Beginning 1931/32 – 2 years	11 years		
	Beginning 1940/41 – 2 years	55 years		
	Beginning 1962/63 – 2 years	13 years	Beginning 1962/63 – 2 years	16 years
<i>South Balkans</i>	No data	No data	No sequential droughts	No sequential droughts
<i>Western France</i>	Beginning 1904/05 – 2 years	29 years		
	Beginning 1932/33 – 2 years	18 years		
	Beginning 1941/42 – 3 years	56 years		
	Beginning 1971/72 – 2 years	17 years	Beginning 1971/72 – 2 years	37 years
<i>Western Mediterranean</i>	Beginning 1923/24 – 2 years	34 years		
	Beginning 1992/93 – 2 years	16 years	No sequential droughts	No sequential droughts

In general, regions were affected by sequential drought lasting about 2 or 3 years. Most exceptional two-year droughts were isolated for Central Iberia ( $T=388$  years) and Ireland ( $T=273$  years). Three-year events were obtained for the total area in Central Iberia ( $T=149$  years), for the drought started in 1980/81, and in Western France ( $T=56$  years), for the drought started in 1941/42.

For Central Europe a drought event lasting 3 years was obtained in 1970/71-1972/73 with an exceptionality of one year in 74. Nevertheless, when the larger sampling period is used this drought can not be considered for sequential years. In fact, some of the conclusions drawn for the shorter-common period are not valid for the larger data set: for instance the two-years drought in Ireland turn out to be much more important ( $T=273$  years) than what was inferred from the analysis using the shorter period.

## CONCLUSIONS

The application of the regional drought model, initially developed for regional drought studies in Portugal, confirms that it can be generalised to larger areas. As for critical areal thresholds, although several values might be used, only when critical areas are above 75% of the total area one gets a good insight into a continental wide drought phenomena. Return period of regional drought is evaluated based on simulations of the data set; the best application uses region's several replicates of 100 years.

The use of long series can restrict the number of data samples and the spatial distribution used. However, the use of series with length close to 100 years is of paramount importance for drought evaluation

in Europe. For this reason, long series analysis methods for changes detection and adjustment are a basic tool for post drought evaluation.

Regional drought return period close to 100 years were observed in Central Europe 20/21, Central Iberia 44/45, Great Britain 58/59 and 75/76, Scandinavia 46/47 and 75/76, and Western France 48/49. In general, regions were affected by sequential drought lasting about 2 or 3 years. Most exceptional two-year droughts were isolated for Central Iberia and Ireland. Three-year events were obtained for the total area in Central Iberia and in Western France.

The spatial distribution of droughts can be obtained each year and drought spread can be observed. In Western Europe drought is not a generalised situation, when it occurs.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The research presented in this paper was carried out in the framework of the ARIDE Project (Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe). This project has the support of the European Commission under the Contract ENV4-CT97-0553.

## REFERENCES

- HENRIQUES, A.G. & M.J.J. SANTOS 1999 – *Regional drought distribution model*, Physics and Chemistry of the earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, Vol.24, n°1/2, pp.19-22.
- ORLANDO, M. 1999 – Secas – Model for the characterisation of regional drought (Modelo de Caracterização de Secas Regionais), Version 1.5, User Guide, ARIDE, INAG, 18 p (only in Portuguese).
- SANTOS M.J.J. 1996 – Regional Drought Distribution Model (Modelo de distribuição de secas regionais). MSc Thesis, Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico, Lisbon, 129 p. (only in Portuguese).
- SANTOS M.J. & HENRIQUES R. 1999 - Analysis of the European annual precipitation series, ARIDE Technical Report nr.3, INAG, 38 p.
- SANTOS M.J., HENRIQUES R., FERNANDES S. & RODRIGUES R. 1999 - Delimitation of Affinity Regions in Western Europe for the application of the Regional Drought Model to annual precipitation data, ARIDE Technical Report nr.4, INAG, 19 p.
- SANTOS M.J., VERÍSSIMO R., FERNANDES S., ORLANDO M. & RODRIGUES R. 2000 – Overview of regional meteorological drought analysis on Western Europe, ARIDE Technical Report nr.10, INAG, 121 p.

# BILAN DE L'ÉROSION SUR LES PETITS BASSINS VERSANTS DES LACS COLLINAIRES DE LA DORSALE TUNISIENNE

Albergel J.\*, Nasri N.\*\*, Boufaroua M.\*\*\*, Pepin Y.\*

\* *Mission IRD, B.P. 434, 1004 Tunis*

\*\* *INRGREF, Ariana, Tunis*

\*\*\* *Ministère de l'Agriculture, D-CES 30 rue Alain Savary, 1002 Tunis*

## RESUME

Une retenue artificielle de petite dimension est un lieu privilégié pour l'observation des bilans d'érosion sur un petit bassin versant. La majorité des transports solides reste piégée dans le réservoir et la partie déversée, lors des rares débordements par le déversoir, peut être estimée à partir de la connaissance des débits déversés et de leur concentration. Un équipement hydro-pluviométrique du barrage couplé à des mesures annuelles de la bathymétrie du lac permet d'établir des bilans précis en eau et en sédiments du bassin versant drainé. Dans la zone semi-aride de la Tunisie Centrale, un réseau de 24 lacs collinaires a été équipé depuis 1993. Les données qu'il fournit peuvent être généralisées à l'ensemble des petits bassins versants de la dorsale tunisienne.

## INTRODUCTION

La majorité des mesures de l'érosion est faite sur des parcelles de taille standard (Wischmeier & al, 1971) et n'intéressent que l'érosion superficielle des sols. A l'exutoire d'un petit bassin versant, le transport de sédiments par la rivière est le résultat de différents processus qui comprennent l'érosion des sols sur les versants, les transferts ou stockage des sédiments, l'effondrement des berges, le charriage de fond, la déposition dans le réseau hydrographique. La connaissance du résultat de ces processus à l'exutoire du bassin intéresse, au premier chef, le concepteur d'ouvrages hydrauliques de rétention des eaux de ruissellement. L'expérience mondiale évalue le taux de perte en volume des barrages dans une fourchette de 3 à 10 % (Gazzalo & Bassi, 1969, Karouachov, 1977). Lorsque l'on s'intéresse aux petites infrastructures tunisiennes, on obtient un chiffre voisin de 5% annuel (CES-ORSTOM, 1997).

Les bassins versants expérimentaux sont reconnus, depuis longtemps, comme le dispositif de mesure le plus adéquat pour l'analyse des transports solides globaux (Toebe & Ourivaev, 1970, Dubreuil & al, 1972). Ils sont aussi le lieu privilégié pour la recherche sur les mécanismes du cycle de l'eau (Verel & Houi, 1994) et des interactions entre usage des sols, aménagements hydrauliques et disponibilité ou qualité de l'eau. La difficulté et le coût de gestion des réseaux pluviométriques et hydrométriques sur des bassins versants de petite taille constituent un handicap sérieux à une bonne connaissance des bilans en eau et en sédiments.

Une retenue alimentée par un seul tributaire, ou pour le moins, par un tributaire principal, est susceptible de fournir une information équivalente à celle que l'on peut obtenir d'une station hydrométrique classique. Pour cela, certaines conditions, souvent moins contraignantes et moins onéreuses que celles nécessaires au bon fonctionnement d'une station hydrométrique, doivent, tout de même, être satisfaites (Nouvelot, 1993).

En Tunisie Centrale, dans la dorsale semi-aride, depuis le Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne, 30 retenues artificielles ont été sélectionnées pour constituer un réseau d'observations hydrologiques. Ces retenues ont des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole. La superficie de leur bassin versant varie de quelques hectares à quelques dizaines km<sup>2</sup>. Elles sont aussi représentatives du gradient pluviométrique de la zone semi-aride à 250 mm de précipitation inter-annuelle jusqu'aux zones subhumides à 500 mm.

Après avoir montré le dispositif expérimental permettant d'analyser le bilan global de l'érosion sur ces bassins versants de retenue et fait le point sur les données, cette communication présente un modèle de reconstitution de l'envasement du barrage crue par crue. Elle discute ensuite de l'intensité de ce phénomène et des facteurs qui l'expliquent.

## DISPOSITIF EXPERIMENTAL, METHODES ET DONNEES

### Installation expérimentale d'un lac collinaire et acquisition des données

Un lac collinaire est équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et de deux centrales d'acquisition automatique de données ; la première est reliée à un capteur pluviométrique à augets basculeurs (0.5 mm de pluie) et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au cm près et sa température. L'évacuateur de crue est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits.

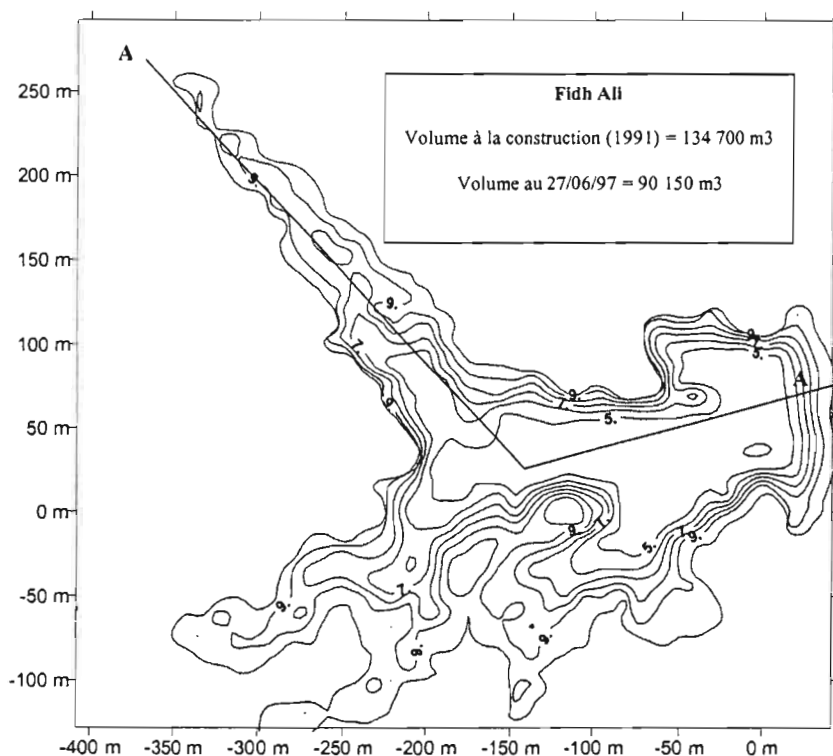
La bathymétrie de chaque lac est effectuée périodiquement. Elle est rapportée au nivellement fin du site et permet d'apprécier le taux d'envasement de la retenue et d'établir les courbes «Hauteur / Volume et Hauteur / Surface». Sur les 30 bassins constituant le réseau d'observation des lacs collinaires (carte 1), des mesures bathymétriques ont été réalisées en nombre suffisant pour une interprétation sur 24 d'entre eux et de manière plus rapprochée, au moins une fois par année hydrologique.



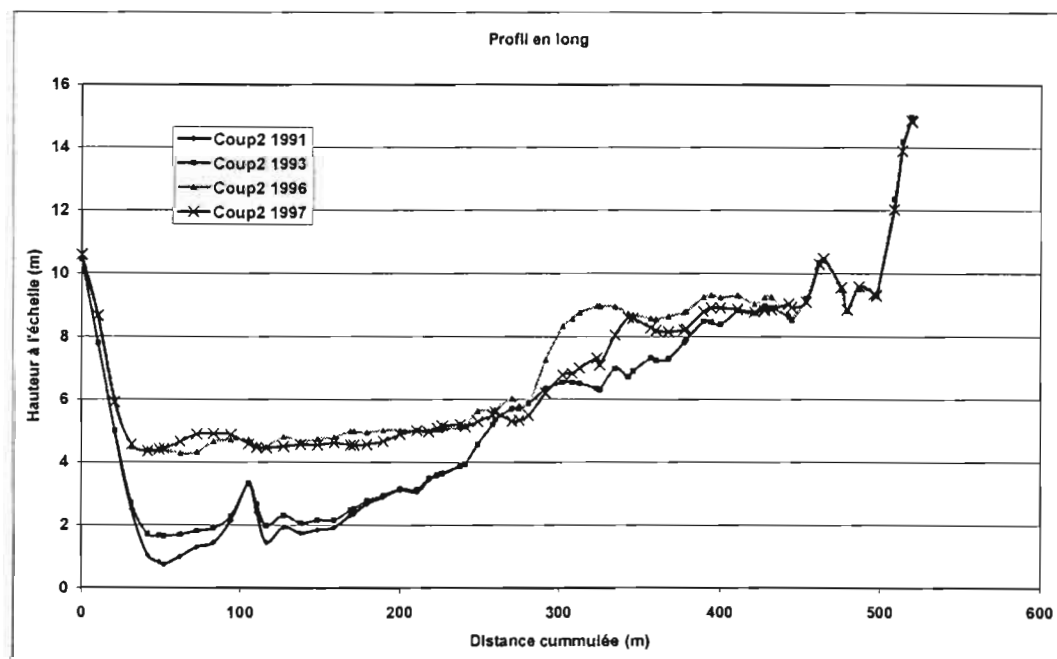
*Carte 1 : Le réseau d'observations des petits barrages tunisiens (rouge : bathymétrie tous les ans)  
Des prélèvements ponctuels des eaux déversées permettent de connaître la matière solide exportée.*

### Estimation du transport solide et du volume de sédiment capturé par la retenue

La bathymétrie de la retenue se fait par sondages ponctuels du fond de la retenue suivant des transversales matérialisées par un câble tendu entre les deux rives. Les extrémités de chaque transversale sont nivelées et positionnées sur le plan de recollement de la retenue. Chaque point sondé (environ 500 par lacs) est défini par trois coordonnées cartésiennes (situation et profondeur). Une géostatistique par la méthode du Krigeage (Matheron, 1965), permet d'établir la relation «hauteur / volume» du lac. Le volume de vase est établi par différence des volumes utiles d'une année à l'autre. La figure 1 montre la bathymétrie du lac Fidh Ali (Bassin versant du Merguellig, Tunisie) mesurée en 1997. La retenue se comporte comme un piège à sédiments et lorsqu'elle n'a pas déversé, le volume de vase correspond au transport solide total produit par le bassin. La figure 2 montre sur la coupe AA l'évolution de la sédimentation de la retenue de 1991 à 1997. En cas de déversement, on attribue aux volumes déversés une concentration moyenne de matière en suspension, obtenue par échantillonnage.



**Fig. 1 : Bathymétrie de Fidh Ali 1997**



**Fig. 2 : Evolution de la sédimentation de la retenue**

Le transport solide pour un ou plusieurs événements est enfin calculé en multipliant le volume de vase par sa densité et en ajoutant la masse des sédiments exportés lors des déversements au dessus du réservoir.

## Estimation du transport solide crue par crue

La reconstitution des transports solides, crue par crue, assimilée à l'érosion globale du bassin, utilise une forme de l'équation universelle des pertes en terres développée par **Williams** (1977) et présentée par **Hadley & al** en 1985. Cette équation s'écrit :

$$A = \alpha(Vq_p)^\beta K(LS)CP$$

Où **A** représente l'apport en tonne de sédiments ; **V**, le volume de la crue naturelle entrant dans le réservoir, en m<sup>3</sup> ; **q<sub>p</sub>**, le débit de la pointe de crue, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> ; **K** le facteur d'érodibilité du sol (il se mesure sur parcelle de référence et n'a pas d'unité) ; **(LS)**, le facteur exprimant la longueur et le degré d'inclinaison de la pente ; **C**, le facteur de couverture végétale ; **P**, le facteur des pratiques conservatrices effectuées sur les versants ;  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres qui, dans le système unitaire international prennent respectivement les valeurs  $\alpha = 11.8$  et  $\beta = 0.56$ .

Le produit  $\alpha K(LS)CP$  est caractéristique d'un bassin pour une saison donnée; le facteur **C** varie en fonction de l'état du tapis herbacé et du stade des cultures. Nous chercherons une valeur moyenne du produit  $\alpha K(LS)CP$  à partir des deux premières mesures d'envasement et nous la validerons en l'appliquant aux suivantes. Cette valeur moyenne est calculée par un modèle d'optimisation en comparant la somme des transports solides obtenue entre deux mesures de bathymétrie l'érosion calculée.

$$T_{sobs} = (V_{vobs} \times d) + \sum V_{dev} \times c$$

$T_{sobs}$  est le transport solide observé,  $V_{vobs}$  est le volume de vase accumulé dans la retenue entre deux mesures de bathymétrie,  $d$  est la densité de la vase,  $V_{dev}$  est le volume d'eau déversé pendant une crue et  $C$  est la concentration moyenne en matière solide des eaux déversées.

Les crues à l'entrée des barrages sont reconstituées suivant un modèle de bilan hydrologique au pas de temps de 5 minutes (CES – ORSTOM, 1996).

## RESULTATS

### Envasement / Erosion

Le tableau 1 récapitule les données d'envasement mesuré pour les 24 barrages. Les 24 unités « lacs collinaires », bien suivies par des mesures d'envasement depuis 1993, avaient une capacité initiale totale de stockage de 2 634 000 m<sup>3</sup>, elles ont perdu 585 200 m<sup>3</sup> en fin 1999, soit 22% pour une durée d'existence moyenne de 7.7 années. La perte moyenne de la capacité de stockage est de 4.6% par an. Suivant les sites, l'importance de l'envasement est très variable. Pour comparer l'envasement des différentes retenues, on a rapporté sa perte de volume à l'unité de surface de son bassin et à l'année. On remarque une forte variabilité de l'envasement annuel moyen d'un bassin à l'autre, celui ci passe de 1 m<sup>3</sup>/ha/an pour les bassins faiblement ruisselant comme celui de Seghir qui se trouve essentiellement sur le cordon sableux de Nabeul à environ 18m<sup>3</sup>/ha/an pour des bassins versants avec marnes gypseuses fournissant de fortes charges solides.

TABLEAU 1 : Envasement et érosion

Station	Surface BV ha	année création	mois dernière mesure	volume initial m3	Volume de sédiments stockés m3	Durée de vie de l'ouvrage années	Envas. rapporté à la surface du bassin et par an m3/ha/an
Sadine 1	384	1988	juin-99	35 070	34 610	11	8.2
Sadine 2	653	1990	sept-98	82 400	82 370	8	15.8
Fidh ben Naceur	169	1990	mai-99	47 110	14 720	29	9.7
Fidh Ali	413	1991	sept-98	134 710	46 235	20	16.0
M'Richet el Anse	158	1991	mars-98	42 400	8 665	34	7.8
El Gouazine	1810	1990	mai-98	237 030	16 030	>100	1.1
Hadada	469	1992	mai-96	84 970	14 060	24	7.5
Janet	521	1992	mai-98	94 280	55 910	10	17.9
El Hnach	395	1992	mai-96	77 400	18 770	16	11.9
Abdessadok	307	1990	sept-98	92 820	25 960	29	10.6
Dekikira	307	1991	juin-96	219 100	21 300	51	13.9
Es Senega	363	1991	juin-98	86 420	27 778	22	10.9
Echar	917	1993	juin-96	186 840	5 300	>100	1.9
Abdeladim	642	1992	juil-99	174 870	6 900	>100	1.5
Arara	708	1993	sept-98	91 150	58 940	8	16.6
El Moudhi	266	1991	sept-98	142 770	26 980	37	14.5
Sbahia 1	324	1993	oct-96	135 570	10 550	39	10.9
Saadine	272	1992	sept-98	35 620	27 610	8	16.9
Es Seghir	431	1992	oct-96	192 460	2 020	>100	1.2
El Melah	85	1991	août-99	19 875	4 778	36	7.0
Kamech	246	1993	juil-99	142 100	25 765	33	17.5
Brahim Zaher	464	1992	sept-99	86 190	31 620	21	9.7
Baouejer	486	1991	juin-96	66 030	6 510	51	2.7

En faisant l'hypothèse, que la moyenne de l'envasement sur la période d'observation (1993-1999) est représentative du régime hydrologique (deux années excédentaires, deux années sèches et deux années moyennes), on peut estimer une durée de vie moyenne des barrages (comblement jusqu'à la cote du déversoir) : 30 % des lacs auraient une durée de vie inférieure à 20 ans et environ 29% une durée de vie supérieure à 50 ans. La durée de vie moyenne face à l'envasement de l'ensemble des lacs serait de l'ordre de 40 ans.

### Reconstitution des transports solides crue par crue : Modèle d'érosion

Le modèle de Williams a été appliqué à cinq retenues parmi les 24 observées. Il peut être généralisé à toutes les retenues. Dans le cadre de cette note les cinq barrages pour lesquels le modèle a été appliqué, sont étagés en latitude est leurs bassins versants sont représentatifs de la géologie de la dorsale Tunisienne. Le tableau 2 donne la dimension des bassins versants choisis, les coordonnées géographiques des barrages, les caractéristiques géologiques des bassins versants, la période de calage du modèle et la valeur du paramètre. Une validation du modèle a été réalisée avec les mesures d'envasement postérieures à la période de calage en utilisant le coefficient obtenu sur la dernière période dans le calage. La figure 3 compare les érosions calculées et observées pour les périodes de calage et pour les périodes de validation du modèle. Au site d'El Gouazine, où un important aménagement en banquettes anti-érosive a été installé en 1996, les valeurs de  $\alpha K(LS)CP$  sont très différentes pour les deux périodes de mesures de bathymétrie. Nous n'avons pas fait de validation, celle ci sera faite à l'occasion d'une prochaine mesure d'envasement.



TABLEAU 2 : Modélisation de l'érosion sur cinq bassins

Lac collinaire	Coordonnées	Géologie	Périodes de calage	Périodes de validation	$\alpha K(LS)CP$
Kamech 245 ha	36°52'18" N 10°52'08" E	Flanc est de l'anticlinal du Cap Bon sur marne, calcaire et grès.	1995-1996 1996-1998	1998-1999	1.22 1.21
Mrichet El Anze 158 ha	36°05'37" N 09°35'41" E	Flanc nord ouest du chaînon anticlinal du Bargou, calcaire et marne du crétacé, reliquat d'encroûtement calcaire du villafranchien	1995 -1996	1996 -1998	2.29
El Gouazine 1810 ha	35°54'30" N 09°42'13"	Vallée dans des alluvions anciennes encroûtées pléistocène dominées en rive gauche par la crête calcaire éocène	1993-1996 1996-1997 (aménag. entre les 2)		0.63 0.05
Fidh Ali 238ha	35°42'40" 09°36'13"	Flanc sud ouest d'un anticlinal , BV entièrement situé dans les formations éocène : marnes gypseuses et lumachelles	1993-1996 1994-1996	1997-1998 1998-1999	3.71 3.68
Essenega 353 ha	35°29'21" 09°06'18"	B.V. dominé par un chaînon du Jbel Semama calcaire du crétacé. Système de faille révélant à l'aval des marnes gypseuses	1995-1996	1997-1998	1.60

La comparaison des valeurs observées et calculées de l'érosion montrent une dispersion plus importante des points en validation qu'en calage. Ce modèle est assez grossier, il pourrait être affiné par un calcul des paramètres K, LS, C, et P à partir d'une cartographie des états de surface. Il est cependant d'une précision suffisante pour simuler une érosion crue par crue du bassin à partir de la connaissance de la variation de la bathymétrie entre deux périodes et la concentration des déversements (figure 4).

L'épisode pluvieux du 28 au 30 Novembre 99 qui a été encadré par deux mesures de bathymétrie et sur lequel des mesures de concentration des eaux déversées ont été réalisées (moyenne des échantillons = 25g/l) a donné l'occasion de vérifier ce modèle (Tableau 3).

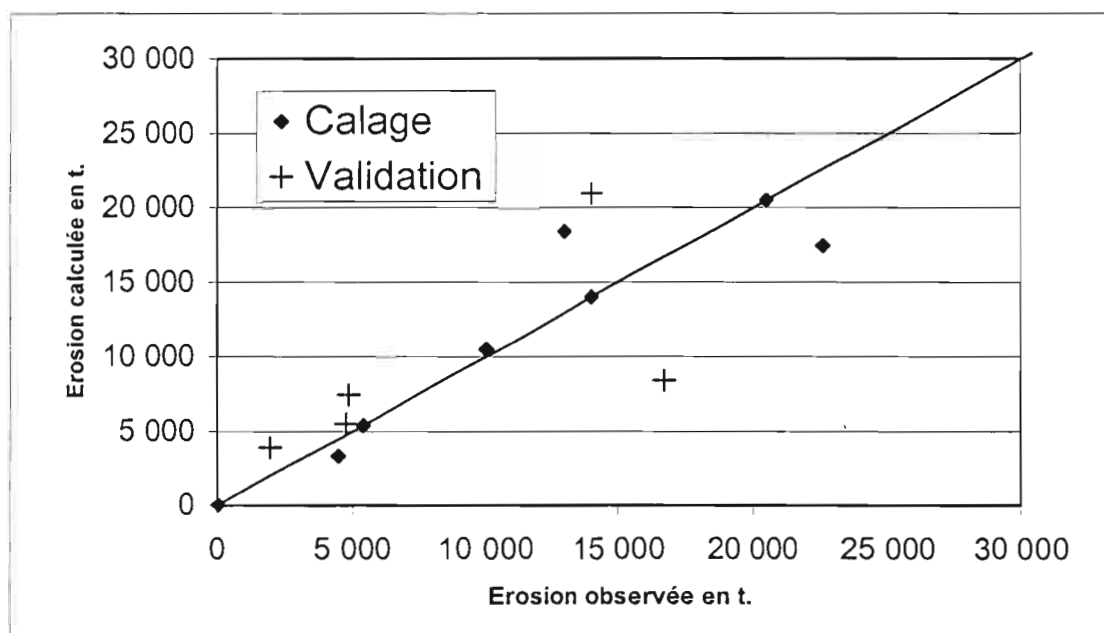


Fig. 3 : Comparaison des érosions calculées et observées en calage et en validation

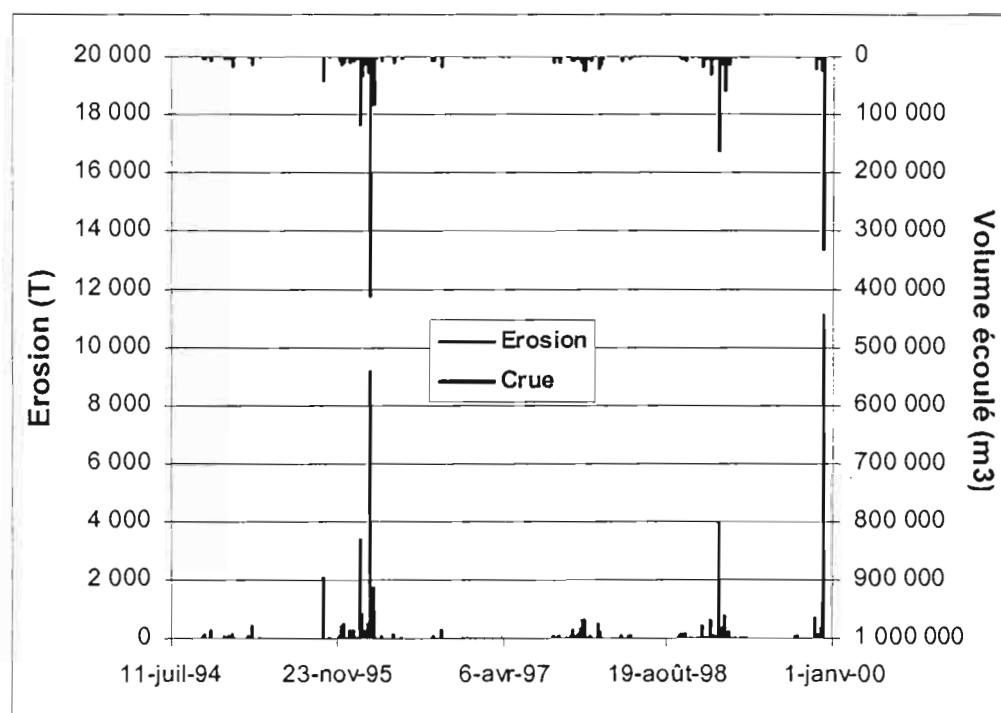


Fig. 4 : Simulation des érosions crue par crue\*

La figure 4 montre bien que le phénomène d'envasement est lié à des événements paroxysmiques. Dans cette chronique de 6 années, trois crues ont apporté 50 % du transport solide (27 février 1996, 18 janvier 1999 et 29 Novembre 1999). La dernière a contribué à elle seule pour 23% du transport observé en 6 ans.

TABEAU 3 : Validation du modèle sur l'événement du 27 au 29 Novembre 1999

Date	Pluie mm	V stocké m3	V déversé m3	V total m3	Qmax m3/s	Erosion calculée T	Sédiment exporté calculé T	Envase ment calculé m3
27-28/11/99	51.0	23 100	0	23 100	1.0	340	0	283
29-30/11/99	145.5	35 773	294 892	330 665	35.4	11 120	7 962	2 632
Envasement mesuré (m3)			2 846			Envasement calculé (m3)		
						2 915		

## CONCLUSION

La forte variabilité des érosions observées sur 24 bassins versants, tous situés dans la dorsale tunisienne, montre la difficulté de mettre au point un système d'estimation simple pour prédire l'envasement des barrages. Les mesures effectuées doivent cependant être interprétées en fonction des particularités de chaque bassin pour arriver à dégager des indicateurs pertinents. La géologie, la taille et la forme du bassin et l'occupation des sols semblent être les indicateurs adéquats. Les bassins sur marnes gypseuses et ceux fortement défrichés sont les plus sensibles. Dans les bassins allongés où le réseau hydrographique entaille des formations dures (calcaires), les barrages sont protégés, les produits de l'érosion se déposent aux ruptures de pente.

Le bassin versant d'El Gouazine montre aussi l'efficacité des aménagements anti érosifs en banquettes mécaniques isohypses. Le facteur aKLSCP du modèle passe de 0.6 à 0.05 après l'aménagement, cela correspond à une diminution globale de l'érosion d'un facteur de 10.

Les lacs sont de très bons pièges à sédiments. Ils remplissent un rôle de protection pour des barrages de plus grandes tailles situés en aval. Mais leur colmatage rapide va à l'encontre d'un développement agricole. Implantés dans des environnements fragiles et à faibles activités économiques, ils sont perçus comme une ressource supplémentaire, rare et vitale : l'eau. Pour pérenniser cette ressource, l'aménagement des versants pour protéger ces lacs devient une priorité. La nature et la densité de ces aménagements doivent concilier la réduction du transport solide sans pour autant priver le lac de ces apports en eau par ruissellement.

## BIBLIOGRAPHIE

- CES - ORSTOM (1996) Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1994-1995. Réseau piloté de surveillance hydrologique. Min. De l'Agr. CES/ORSTOM. Tunis. 140 p.
- CES - ORSTOM (1997) Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1995-1996. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Min. De l'Agr. CES/ORSTOM. Tunis. 184 p.
- DUBREUIL P., Chaperon P., Guiscafré J., Herbaud J. (1972) Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.
- GAZZALO T. & BASSI G. (1969) Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituant les bassins versants des cours d'eau italiens. *Extraits de publications de l'Agence Italienne d'Hydraulique*, n° 53.
- HADLEY R.F, LAL R., ONSTAD C.A., WALING D.E., YAÏR A. (1985) Recent developments in erosion and sediments yield studies. UNESCO, Paris
- KARAOUCHOV A.V., (1977) Les débits solides , analyses et répartition géographiques. Hydrométéoridat, Leningrad, 238 p.
- MATHERON G. (1965). Les variables régionalisées et leur estimation. Paris : Masson, 360p.
- NOUVELOT J.F. (1993) Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH/ORSTOM/CEMAGREF/FAO . Montpellier. 500 p.
- TOEBES, C., OURJAEV, V. (1970) Representative and experimental basins. An international guide for research and practice. UNESCO *Studies and reports in Hydrology* n°4 348p.
- VEREL J.L. & HOUÏ D. (1994) Du concept de Bassin Versant Représentatif à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales, actes du Séminaire, GIP Hydrosystème, CEMAGREF PARIS, Mai 1994.
- WILLIAMS J.R. (1977) Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. *AISH*, publi. 122.
- WISCHMEIER W.H., JOHNSON C.B., CROSS B.V. (1971) A soil erodibility monograph for farm land and construction sites. *J. of soil and water* Vol 265.

# APPROCHE GEOCHIMIQUE ET ISOTOPIQUE DES RELATIONS ENTRE LAC COLLINAIRE ET AQUIFERES : CAS DU BASSIN DE KAMECH, TUNISIE.

Gay D.\*, Albergel J\*\*, Grunberger O.\*\*\*, Nasri S.\*\*\*\*, Michelot J. L.\*\*\*\*\*, Montoroi J.P.\*\*\*

\* LHGI, UMR " Orsay Terre " CNRS- Univ. Paris-Sud, 91405 Orsay cedex, France,

\*\* IRD Mission en Tunisie, BP 434, 1004 Tunis-El- Menzah, Tunisie,

\*\*\* IRD, 32 av. Varagnat, 93143 Bondy cedex, France,

\*\*\*\* INRGREF rue 7050, B.P. 10 2080 Ariana

\*\*\*\*\* UMR " Orsay Terre " CNRS- Univ. Paris-Sud, 91405 Orsay cedex, France,

## RESUME

Un suivi hydrologique de la retenue de Kamech, en Tunisie, laisse supposer la possibilité d'infiltrations. Afin de préciser les relations entre le lac et l'aquifère sous-jacent, une étude géochimique et isotopique de reconnaissance a été réalisée. Cette étude a permis la caractérisation des trois groupes d'eaux du bassin versant, les eaux souterraines, les eaux de talweg, et les eaux du lac, préalable nécessaire à la détermination de l'influence du lac sur l'aquifère en aval. En raison des faibles dimensions du système, de fortes variations temporelles sont suspectées, sans que la durée de l'étude n'ait permis de les déterminer avec précision. Ces variations temporelles empêchent d'acquiescer une certitude sur une participation significative de la retenue à l'alimentation de la nappe. Ce type d'étude pourrait être amélioré en complétant la caractérisation spatiale par un suivi temporel. Ceci est actuellement réalisé sur trois autres retenues collinaires en Tunisie (El Ogla, El Gouazine et Dèkikira).

**Mots clefs :** lac collinaire ; isotopes ( $^{18}\text{O}$ ,  $^2\text{H}$ ) ; hydrochimie ; infiltration ; Tunisie.

## INTRODUCTION

Dans le cadre du programme européen « Hydromed », le lac collinaire de Kamech fait l'objet d'un suivi hydrologique depuis quatre ans (Albergel & Rejeb, 1997). L'objectif de la présente étude est de préciser les relations entre les différents types d'eaux de ce bassin, à l'aide de traceurs naturels chimiques et isotopiques.

Le lac de Kamech se situe au Nord-Est de la Tunisie, dans la péninsule du Cap Bon (Fig. 1). Le climat est de type méditerranéen humide, avec des précipitations annuelles qui varient entre 400 et 800mm/an. La pluviométrie maximum est enregistrée en décembre/janvier. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 14°C (in Rahaingomanana, 1998). D'un point de vue géologique, le bassin versant de Kamech se situe dans une zone d'affleurement du Vindobonien (Miocène moyen) présentant une alternance de marnes gypseuses et de banc de grès orientés NE-SW. Les sols du bassin versant sont à dominante calcimagnésique, bruns calcaires vertiques, tronqués ou hydromorphes. La végétation naturelle n'existe quasiment plus dans le bassin de Kamech, à l'exception des quelques hectares qui subsistent à l'aval des fronts de barres gréseuses. La création de la retenue a permis le développement d'une nouvelle irrigation ; 6ha du bassin sont irrigués à partir du lac (Mekki, 1999).



Fig. 1 : Localisation de la zone d'étude

La capacité du réservoir de Kamech est de 142 560m<sup>3</sup> pour un bassin versant de 2.45km<sup>2</sup>. Les caractéristiques principales du bassin versant et de la retenue sont résumées dans les tableaux 1 et 2.

TABLEAU 1 : caractéristiques du bassin versant.

Surface BV	ha	245,5
Périmètre BV	km	7,25
Indice de compacité		1,3
longueur du rectangle équivalent	km	2,72
largeur du rectangle équivalent	km	0,9
Altitude maximale	m	203
Altitude minimale	m	95
Indice de pente	m/km	40
Dénivelée	m	108

TABLEAU 2 : caractéristiques de la retenue.

Année de construction		1991
Latitude Nord		36°52'18"
Longitude Est		10°32'03"
Volume au déversement (Vi)	m3	142560
Surface au déversement (Si)	ha	4,466
Hauteur de la digue	m	10
Longueur de la digue	m	125
Nature du déversoir		béton triangulaire
Hauteur du déversoir	m	8,71
Largeur du déversoir	m	8,85
Diamètre de la conduite	mm	300

L'étude du bilan hydrologique de la retenue permet de supposer l'existence d'échanges entre la retenue et l'aquifère. Ce bilan peut se résumer par l'équation suivante :

$$\Delta V = (V_r + V_p + V_{esc} + V_f) - (V_{ev} + V_d + V_{vi} + V_i + V_u).$$

avec  $\Delta V$  : variation de stock dans la retenue,  $V_r$  : apports en provenance du ruissellement des versants,  $V_{esc}$  : apports souterrains,  $V_p$  : apports des précipitations tombant directement sur la retenue,  $V_f$  : apports dus à la fonte des neiges,  $V_{ev}$  : volume d'eau évaporé,  $V_d$  : volume déversé,  $V_{vi}$  : volume sortant par la vanne de vidange,  $V_i$  : pertes par infiltration, et  $V_u$  : volume d'eau prélevé pour divers usages, essentiellement l'irrigation (voir, par exemple CES-ORSTOM, 1996, 1997).

Par clôture du bilan, on détermine au niveau journalier  $V_{esc}-V_i$ . On constate alors qu'il est généralement négatif, même durant les mois d'hiver. Ceci suggère une perte par infiltration dominante, mais n'exclut pas pour autant un apport souterrain qui serait néanmoins inférieur à l'infiltration.

Afin de préciser les relations entre le lac et l'aquifère sous-jacent, une étude géochimique et isotopique de reconnaissance a été réalisée. On cherche à savoir s'il y a une fuite, qu'elle est son importance et si elle alimente un aquifère en aval. Les prélèvements ont été effectués du 15 mars au 10 avril 1999 (GAY, 1999).

### Les caractéristiques géochimiques et isotopiques des eaux du bassin :

Des mesures de teneurs en isotopes stables (oxygène 18 et deutérium) ont été réalisées sur 29 échantillons d'eaux (Fig. 1) : 2 échantillons du lac, 12 échantillons d'eau de surface, 12 échantillons d'eau souterraine, ainsi que 3 échantillons prélevés à trois jours d'intervalle dans un bac contenant de l'eau du lac. Les résultats de ces analyses sont présentés sous forme de graphiques mettant en relation les teneurs en deutérium et les teneurs en oxygène 18. Dans ce type de graphique, les points représentatifs des précipitations s'alignent sur une droite de pente 8 qui caractérise un processus de condensation à l'équilibre isotopique, et d'ordonnée à l'origine (d) variable. A l'échelle mondiale, en particulier pour les précipitations d'origine océaniques, d est très proche de 10 :  $\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10$  (Craig 1961)

Lorsque la vapeur à l'origine des précipitations provient d'une mer fermée, telle la Méditerranée,  $d$  est supérieur à 10. Ainsi, ce paramètre peut atteindre une valeur de +22 dans le bassin de la Méditerranée orientale (Gat & Carmi, 1970). Pour ce qui concerne la Tunisie septentrionale, l'influence méditerranéenne se traduit par une valeur de  $d$  voisine de 12.5 (station de Tunis-Carthage, IAEA/WMO, 1999).

Un processus d'évaporation dans un environnement naturel engendre des phénomènes de fractionnement isotopique hors-équilibre. Lors de l'évaporation, les isotopes lourds ( $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ ) resteront préférentiellement dans la phase la plus « condensée ». Ainsi la vapeur d'eau se formant à partir d'une surface liquide sera appauvrie en isotopes lourds, tandis que l'eau résiduelle sera enrichie par rapport à l'eau initiale. Dans un diagramme  $\delta^2\text{H}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$ , une pente inférieure à 8 est caractéristique d'un processus d'évaporation. Cette pente dépend principalement de l'humidité relative de l'air  $h_r$ , au moment de l'évaporation. Elle peut diminuer jusqu'à 3 lorsque  $h_r$  est très faible. (Gonfiantini, 1986).

Dans le cas de Kamech, les trois échantillons prélevés dans le bac permettent d'établir une droite d'évaporation, puisque dans un graphique  $\delta^2\text{H}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$  ils définissent, à partir du point représentatif de l'eau du lac, une droite d'équation  $\delta^2\text{H} = 4.9 \delta^{18}\text{O} - 5.1$  (Fig.2). Il est remarquable que le point représentatif d'un échantillon d'eau du lac prélevée en août 98 se situe également sur cette droite, avec des teneurs isotopiques plus élevées. Ceci suggère que les conditions d'évaporations sont relativement proches d'une saison à l'autre, et donc que les humidités relatives de l'air sont similaires.

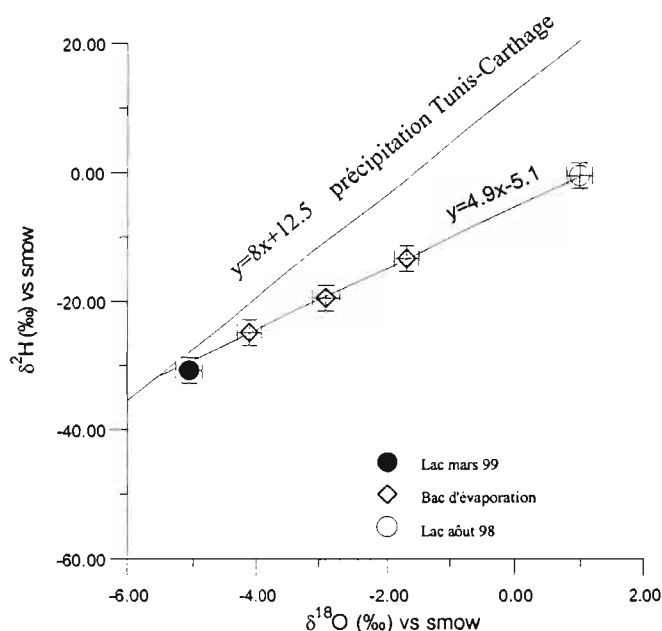


Fig. 2 : Droite d'évaporation

Les résultats des analyses chimiques sont présentés de façon synthétique, dans les tableaux 3, 4, 5, et 6.

TABEAU 3: moyennes des teneurs chimiques des eaux des puits.

	$\text{Ca}^{++}$ meq/l	$\text{Mg}^{++}$ meq/l	$\text{K}^+$ meq/l	$\text{Na}^+$ meq/l	$\text{HCO}_3^-$ meq/l	$\text{Cl}^-$ meq/l	$\text{NO}_3^-$ meq/l	$\text{SO}_4^{--}$ meq/l	$\text{SiO}_2$ (mg/l)	cond ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH
Moyenne	10,2	5,65	1,24	14,09	5,64	14,33	1,04	9,45	8,8	2953,	7,50
Minimum	4,6	0,10	0,07	6,33	1,66	6,76	0,03	0,52	1,0	1343	6,87
Maximum	23,9	13,23	8,89	22,03	8,90	30,60	8,22	28,65	19,1	5910	8,33

TABEAU 4: moyennes des teneurs chimiques des eaux de source.

	$\text{Ca}^{++}$ meq/l	$\text{Mg}^{++}$ meq/l	$\text{K}^+$ meq/l	$\text{Na}^+$ meq/l	$\text{HCO}_3^-$ meq/l	$\text{Cl}^-$ meq/l	$\text{NO}_3^-$ meq/l	$\text{SO}_4^{--}$ meq/l	$\text{SiO}_2$ (mg/l)	cond ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH
--	---------------------------	---------------------------	-----------------------	------------------------	---------------------------	------------------------	--------------------------	-----------------------------	--------------------------	-------------------------------------	----

Moyenne	8,15	6,20	0,19	14,23	5,36	13,03	0,23	8,29	9,05	2359	8,14
Minimum	5,25	2,25	0,09	7,95	4,23	7,81	0,00	2,33	6,4	1482	7,4
Maximum	12,31	10,88	0,30	23,67	6,69	22,37	0,72	18,75	11,0	2980	8,69

TABLEAU 5: moyennes des teneurs chimiques des eaux du Talweg.

	$Ca^{++}$ meq/l	$Mg^{++}$ meq/l	$K^+$ meq/l	$Na^+$ meq/l	$HCO_3^-$ meq/l	$Cl^-$ meq/l	$NO_3^-$ meq/l	$SO_4^{--}$ meq/l	$SiO_2$ (mg/l)	cond ( $\mu S/cm$ )	pH
Moyenne	9,73	7,72	0,22	13,43	5,63	12,54	0,10	12,61	6,06	2666	8,17
Minimum	3,60	3,44	0,12	6,00	3,17	4,51	0,00	4,17	3,4	1184	7,30
Maximum	12,81	10,82	0,30	18,54	8,50	25,41	0,42	22,92	7,7	3490	8,36

TABLEAU 6: moyennes des teneurs chimiques des eaux du lac.

	$Ca^{++}$ meq/l	$Mg^{++}$ meq/l	$K^+$ meq/l	$Na^+$ meq/l	$HCO_3^-$ meq/l	$Cl^-$ meq/l	$NO_3^-$ meq/l	$SO_4^{--}$ meq/l	$SiO_2$ (mg/l)	cond ( $\mu S/cm$ )	pH
KL7	3,40	2,43	0,16	5,33	5,67	4,11	0,02	1,56	3,5	980	8,98
KL14	3,21	2,19	0,13	5,19	2,39	4,11	0,00	3,31	3,3	1001	8,92
Moyenne	3,31	2,31	0,14	5,26	4,03	4,11	0,01	2,44	3,4	990,5	8,95

### Les eaux souterraines :

Les eaux prélevées dans les puits (tab.3) sont les eaux les plus minéralisées. Leurs teneurs en  $SiO_2$  sont significativement supérieures à celles des autres eaux. Leur faciès est chloruré-sulfaté - sodique et calcique. La pression partielle équilibrante de  $CO_2$  calculée pour ces eaux est de  $10^{-2,1}$  atm en moyenne. Cette  $pCO_2$  indique une recharge par infiltration au travers de sols relativement actifs. Ces eaux souterraines sont saturées vis-à-vis de la calcite, elles sont sous-saturées en gypse et en silice. Elles présentent les plus hautes teneurs en nitrate de l'ensemble des eaux du bassin.

- Les eaux de source (tab.4) présentent une conductivité moyenne plus faible que celles des puits, principalement en raison de leurs teneurs en nitrate et en potassium plus faibles. Leur pression partielle de  $CO_2$  moyenne, de  $10^{-3,05}$  atm est intermédiaire entre celle d'un sol et celle de l'atmosphère.
- Dans le diagramme  $\delta^2H$  versus  $\delta^{18}O$  (Fig.3), les points représentatifs des eaux souterraines se situent autour de la droite d'évaporation. Ils sont assez bien regroupés entre -4 et -5‰ vs SMOW en  $^{18}O$  et autour de -30‰ vs SMOW en  $^2H$ . En prenant en compte la marge d'erreur sur les mesures, les teneurs isotopiques des eaux souterraines sont comparables aux teneurs moyennes annuelles des précipitations (-4,5‰ vs SMOW en  $^{18}O$ , et -25,8‰ vs SMOW en  $^2H$ ), à l'exception des eaux de certains puits situés en aval du lac qui présentent des teneurs en isotopes lourds légèrement supérieures.



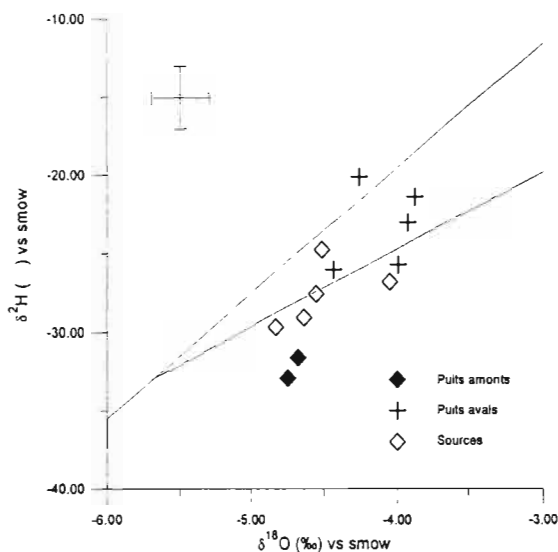


Fig. 3 : Diagramme  $\delta^2H$  vs  $\delta^{18}O$  des eaux souterraines

### Les eaux de talweg :

Les eaux des talwegs (tab.5), comme les eaux de source, ont des  $pCO_2$  intermédiaires entre une  $pCO_2$  de sol et la  $pCO_2$  atmosphérique. Ces eaux sont à saturation vis-à-vis de la calcite, de la dolomite, et de la magnésite, et sont sous-saturées en gypse et silice. Leur minéralisation est très variable : dans certains cas, elle peut être plus faible que le minimum des eaux de sources et de puits, et dans d'autres cas, plus fortes que le maximum pour les eaux des sources. Elles peuvent donc être considérées comme un groupe d'origine mixte, résultant d'un mélange entre eaux de ruissellement, et eaux souterraines.

- Dans un diagramme  $\delta^2H$  versus  $\delta^{18}O$  (Fig.4), les points représentatifs des eaux d'écoulement de surface sont, pour la plupart, regroupées autour de la droite d'évaporation vers des teneurs en isotopes lourds plus élevées que celles des eaux souterraines (entre -4 et -3‰ vs SMOW en  $^{18}O$  et entre -21,5 et -25,8‰ vs SMOW en  $^2H$ ). Cette position, proche de celle de la moyenne des précipitations du mois de mars, suggère que la contribution du ruissellement récent est largement majoritaire.

### L'eau du lac :

- Les eaux du lac (tab.6) sont les eaux les moins minéralisées du bassin. Les ions dominants sont le chlorure et le sodium. Le lac est faiblement chargé en sulfate. La pression partielle équilibrante de  $CO_2$  est de  $10^{-3,9}$  atm, très proche de l'équilibre avec l'atmosphère. Les indices de saturation montrent que l'eau est saturée vis à vis de l'aragonite, de la calcite, de la dolomite et de la magnésite, et sous-saturée en silice et en gypse.

Dans le diagramme  $\delta^2H$  versus  $\delta^{18}O$  (Fig.4), l'eau du lac semble être la moins évaporée de toutes les eaux. Elle est très proche de la pluie moyenne des mois d'hiver.

Les données hydrologiques montrent que l'eau du lac, au mois de mars, résulte d'un mélange complexe : eaux de pluie des mois de décembre-janvier, eaux évaporées de la saison sèche, eaux de ruissellement liées aux dernières pluies du mois, eaux du talweg amont. L'étude des teneurs isotopiques permet de préciser que la pluie de la dernière saison pluvieuse est le pôle qui domine ce mélange. Ceci s'explique par le fait qu'aux mois de janvier et février, le lac subit une série de débordements liés à des pluies importantes qui engendre des crues. On peut alors considérer qu'à ce moment, l'eau du lac est presque entièrement renouvelée. La contribution correspondant aux eaux évaporées de la saison sèche, ainsi que le volume d'eau provenant du talweg amont deviennent alors négligeables. Le lac est donc essentiellement rempli par des eaux de ruissellement et les précipitations directes. Cette eau n'a quasiment pas subi de transit souterrain, c'est pourquoi ses teneurs en éléments dissous (en particulier la silice) sont faibles.

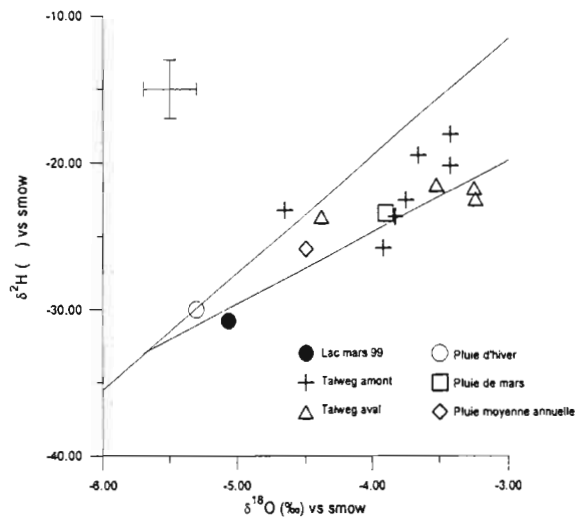


Fig. 4 : Diagramme  $\delta^2H$  vs  $\delta^{18}O$  des eaux de surface

### Influence du lac sur l'aquifère :

Les teneurs en isotopes lourds des eaux prélevées dans les puits en aval du barrage sont plus élevées que celles des eaux du lac en mars (Fig.5). Si le lac participe significativement à l'alimentation de l'aquifère alluvial en aval, il faudrait admettre que l'on retrouve dans l'aquifère en mars, à environ 500m du lac, des eaux du lac évaporées pendant la saison sèche, 6 à 8 mois plus tôt. La vitesse de percolation dans l'aquifère qui correspondrait à cette situation ( $V_{\text{efficace}} \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$ ), ne semble pas aberrante pour ce type d'aquifère. Toutefois, cette possibilité d'alimentation de l'aquifère par le lac reste à l'état d'hypothèse de travail pour deux raisons majeures :

1. Il semble, d'après la structure et la topographie du bassin, que des apports latéraux puisse compliquer le bilan de l'aquifère en aval de la retenue. Ces apports latéraux pourraient être à l'origine des teneurs en isotopes lourds d'un échantillon d'eau prélevé dans le talweg en aval immédiat de la retenue, teneurs en isotopes lourds sensiblement plus élevées que celles de l'eau du lac en mars.
2. La courte durée de l'étude n'a pas permis d'obtenir des données assez espacées dans le temps pour avoir une idée précise de l'évolution des caractéristiques chimiques et isotopiques des différents pôles impliqués dans les mélanges.

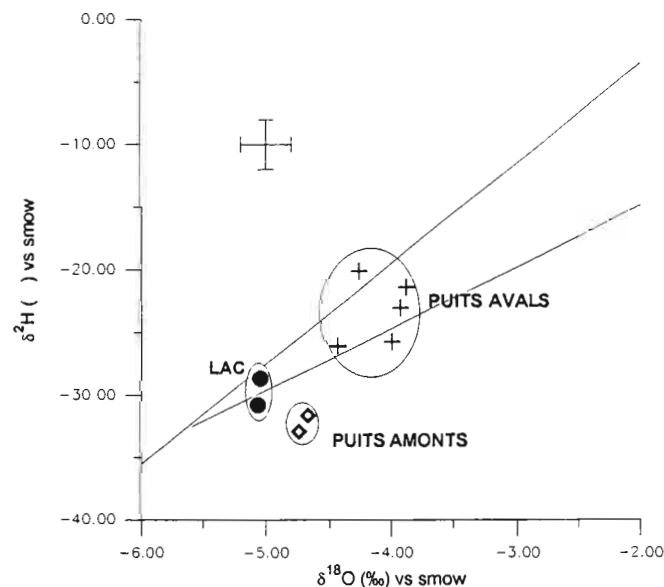


Fig. 5 : Influence du lac sur l'aquifère

## CONCLUSION :

L'étude des teneurs chimiques des eaux du bassin, (eaux souterraines, eaux de talweg, eaux du lac), montre que, hormis celles du lac, les eaux ne présentent pas de grandes différences de faciès. De fortes variations de teneurs en éléments dissous sont observées à l'intérieur des différents groupes. Cependant les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans les eaux souterraines, en particulier pour le sulfate et la silice, les temps de contact avec la roche (marnes gypseuses et grès) étant évidemment plus long pour ces eaux souterraines que pour les eaux prélevées en surface.

Les résultats des mesures isotopiques ( $^{18}\text{O}$  et  $^2\text{H}$ ) montrent que les eaux souterraines se distinguent bien des eaux de surface, mais que l'eau du lac est la moins évaporée de toutes. L'échantillonnage ayant eu lieu au mois de mars, les teneurs en isotopes stables de l'eau du lac reflètent directement celles des précipitations hivernales, sans que l'évaporation ait eu le temps de les affecter significativement.

L'ensemble des données acquises ne permet pas de mettre en évidence avec certitude une participation significative de la retenue à l'alimentation de l'aquifère en aval. Toutefois, cette première reconnaissance n'a pu fournir qu'une image " instantanée " d'un système que ses faibles dimensions rendent particulièrement sensibles aux variations temporelles.

Ce type d'étude pourrait donc être amélioré en complétant la caractérisation spatiale par un suivi temporel. Ceci est actuellement réalisé, sur trois autres retenues collinaires en Tunisie (El Oglia, El Gouazine et Dékikira).

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL, J. & REJEB, M. (1997) Les lacs collinaires en Tunisie ; enjeux, contraintes et perspectives. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 83,2.
- CES-ORSTOM (1996) Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1994-1995, Tunis, 140p.
- CES-ORSTOM (1997) Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1996-1997, Tunis, 200p.
- CRAIG, M. (1961) Isotopic variations in meteoric water. *Science*, 133, p1702-1703.
- GAT, J.R. & CARMI, I. (1970) Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area, *J. Geophys. Res.* 75, 3039.
- GAY, D., (1999) Géochimie isotopique des relations hydrologiques entre lac de retenue et aquifères. lac collinaire de Kamech, Tunisie. Mém. DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géochimie et Géostatistique, Univ. Paris-Sud, Orsay.
- GONFIANTINI, R., (1986) Environmental isotopes in lake studies. In : *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Volume II (ed. by Fontes J. C. & Fritz P.), 113-163. Elsevier, Amsterdam.
- IAEA/WMO, (1999) Global network for isotopes in precipitation, the GNIP database, Release3. <http://www.iaea.org>.
- MEKKI, I., (1999) Etude intégrée du bassin versant de Kamech et de l'exploitation de l'eau collectée pour l'irrigation. Troisième cycle INAT, Année de spécialisation. (Tunisie).
- RAHAINGOMANANA, N.,(1998) Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore. *Thèse de doctorat Univ. Montpellier I*, 308 p.

# CHEMICAL EROSION OF A GULLY HEAD: RAINFALL SIMULATION EXPERIMENT ON A GYPSIC MEDITERRANEAN SOIL (FIDH ALI WATERSHED, CENTRAL TUNISIA).

Grünberger O.\*, Reyes Gomez V.\*\*\*, Montoroi J.P\*, Dridi B.\*\*\* & Agrebaoui

\* IRD (Institut de recherche pour le développement), Centre de recherches d'Ile-de-France, 32 rue Henri Varagnat, 93143 Bondy, France.

\*\* Instituto de Ecologia de Mexico, AP 632, 34100 DGO, Durango, Mexico.

## ABSTRACT

The backward erosion of gypsic soils in the Fidh Ali watershed causes important problems for downstream reservoirs. The upper parts of the gullies are associated with the piping process. Two long rainfall simulation experiments (more than 5 hours) were applied to characterize internal hydrodynamic features and solute transport. Minidisk infiltrometer measurements and adjustment of the infiltration curve demonstrated that soil without piping has an impermeable layer at about 35 cm while the closeness of the piping phenomena implies that a drainage flux of 10 mm h<sup>-1</sup> appears at about 60 cm above surface level. The temporal and spatial evolutions of the runoff and drainage fluxes show a contrasting behavior for the 2 plots. Apparently, piping takes rarely place, only after various successive runoff events. As the chloride content of the reservoir and the runoff water is similar, the contribution of the drainage water, in contact with the saline soil layers, is less than a few per cent. In turn, the comparison of reservoir and runoff water in terms of sulfate leads to a relative contribution, from 24 to 30%, of the superficial drainage water in contact with the upper soil layers.

## KEYWORDS

Rainfall simulation, salinity, solute transport, leaching, piping, gypsic soils, Tunisia

## INTRODUCTION

The construction of one thousand small reservoirs is planned by the state authorities of Tunisia with the central aim of providing appropriate water supply for habitation, breeding and small irrigation in mountainous semi arid zones. Other expected effects are enhancement of aquifer recharge, retaining of erosion products and better flood regulation.

Beside hydrologic problems, such as excessive water loss by infiltration, a relative failure of the water management is sometimes occurring when the solute content of the stored water exceeds useful range and when the erosion deposits tend to quickly fill up the reservoir (Albergel and Rejeb, 1997). This is the case for Fidh Ali reservoir in which an erosion is occurring. The gully network is mainly formed by gypsum dissolution and piping process occurring in gypsic soils. Therefore, reservoir water salinity reaches a value often too high for irrigation use (Rahaingomanana, 1998).

As the piping process is clearly a consequence of gypsum dissolution, the objective of the present work is to determine the relationships between the hydrodynamic soil behavior and the chemical content of the soil solution, these mechanisms contributing to the water quality and the replenishing of a downstream reservoir.

## MATERIAL AND METHODS

The 412.5 ha Fidh Ali watershed (34°42'40''N, 9°36'13''E) is located on Eocene sedimentary material. The deposits are formed by a succession of gypsic clayey and calcareous layers. Soil survey at 1/20 000 scale was carried out by Collinet and Zante (1999). Experimental site is located in Unit 5 defined by these authors as immature calcimagnesian soils containing quartz, gypsum, calcite and 2:1 clay mineral representing about a 22% weight rate. Erosion is intense and the volume of erosion products, deposited in the reservoir during the last 8 years, as of 1999 was 37% of the reservoir initial volume. Gullies are well developed in the upper part of the watershed where they reach 6 meters in depth (Collinet and Zante, 1999). The head of the gully is often an overhanging erosion front. Marks of chemical dissolution appears in the gully wall as the outlets of

cavities, pipes and fissures and the collapsed cavities produce small depressions in the soil surface, These phenomena are common in gypsic deposit (Gutiérrez and Santolalla, 1998).

A DeltaLab® mini rainfall simulator was used on two 1 m<sup>2</sup> plots. Both the plots were nearby an eroded gully head in the upper part of the watershed. One of the plots (plot 1) was situated in the talweg where gypsum dissolution and piping process were clearly observed (Fig. 1). The other plot (plot 2) was located laterally in a place where there was no indications of piping process. The two plots were equipped with horizontal PVC drainage pipes at 3 distinctive depths according to soil layer configuration.

Before rainfall simulation, soil profile was described and sampled. Soil water content was measured by gravity method and diluted soil solution (1:5) was extracted.

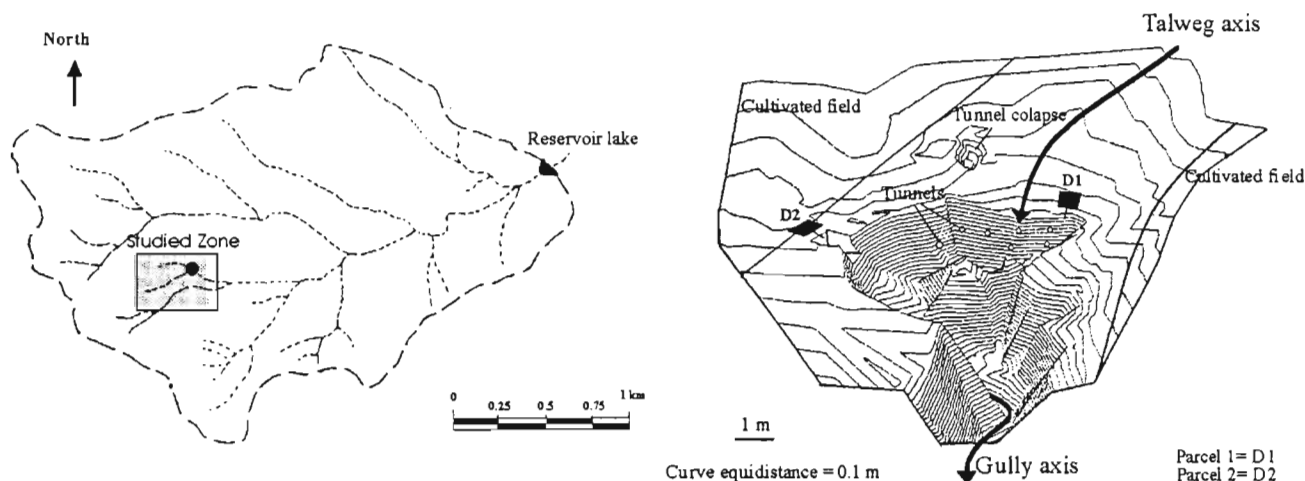


Fig. 1 : Location of the studied zone in Fidh Ali watershed (left) and the experimental plots (D1 = plot 1 and D2 = plot 2) above the erosion front (right).

Rainfall experiments were performed to simultaneously obtain soil solution from the surface plot outlet (runoff flow) and, from most of the artificial drainage pipes, to monitor the temporal evolution of the water quality and the chemical content. The applied intensity was 31 mm h<sup>-1</sup> at the beginning of the experiment and was exhausted at 42.6 mm h<sup>-1</sup> after 1 h for the plot 1 because of the insufficient volume of runoff water. The rainfall simulation was delimited to the annual rainfall range of the ten driest years observed at the nearest meteorological station (231 mm). The applied rainfall water was chosen to have the lowest solute content, the electrical conductivity (EC) equal to 0.349 dS m<sup>-1</sup>.

During the rainfall simulation, three TDR moisture probes were monitored at distinctive levels to follow the soil water front. Although for plot 1, the temporal moisture monitoring was completed, in the case of plot 2, when water front reached the probes, an error signal due to a highly soil salinity was delivered preventing the measurement. All the sampled solutions of the runoff and the drainage water were immediately filtered at 45 µm. Electrical conductivity (EC), pH, alkalinity were measured in field. Major elements (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) were firstly determined using a Hatch® DR/2010 portable spectrophotometer and secondarily confirmed at IRD laboratory using a Dionex® HPLC and an atomic spectrometer for Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>. Mineral saturation indexes were computed using the WateqF calculation program (Truesdell, 1974).

After the rainfall simulation, 62 measurements (37 for plot 1, 25 for plot 2) of the soil sorptivity were carried out at each soil layer using a minidisk infiltrometer and the Znang method (1997) for calculating hydraulic conductivity. The soil salinity using the diluted soil solution extraction (1:5 ratio), the water content using the gravity method and the bulk density using the cylinder method were also measured.

## RESULTS

### Hydrodynamic behavior

Rainfall amounts were nearly the same in the two simulation experiments (Table 1). Although a similar runoff rate was observed and the initial water content was higher for plot 2, the infiltration, drainage and "escaping" water rates were twice as high for plot 1. The infiltration evolution during the experiments (Fig. 2 and Fig. 3) confirm that plot 1 has a hydrodynamic behavior strongly different from plot 2. After 4 h rainfall, infiltration rate was about  $15 \text{ mm h}^{-1}$  for plot 1 and  $0.3 \text{ mm h}^{-1}$  for plot 2. Artificial drainage started at 2 h 54 mn for plot 2 and at 3 h 10 mn for plot 1. For plot 1, the drainage flow was twice as high and a 60 cm soil layer was saturated when the artificial drainage pipes started flowing. At this time, cumulative infiltration was 50.3 mm for plot 2 (close to 57 mm soil water content in Table 1) and 84 mm for plot 1 (close to 87.1 mm soil water content in Table 1). Thus, gravity drainage was the only flow appearing in cavities, natural pipes and fissures, formed by piping process, and starting with the water saturation of the superficial layers.

TABLE 1: External and internal water balance for piping affected plot (plot 1) and non-piping affected plot (plot 2) during rainfall simulation

SIMULATION TIME 5 h 27 mn (plot 1)    8 h 13 mn (plot 2)	Volume (mm or $\text{l m}^{-2}$ )		Mean intensity ( $\text{mm h}^{-1}$ )	
	Plot 1	Plot 2	Plot 1	Plot 2
<b>EXTERNAL WATER BALANCE</b>				
Simulated rainfall (P)	231.9	252.3	42.6	30.7
Runoff (R)	107.2	169.3	19.7	20.0
Infiltration ( $I = P - R$ )	124.6	83.0	22.8	10.7
<b>INTERNAL WATER BALANCE</b>				
Initial water content [0-72cm] ( $S_0$ )	173.2	276.8		
Final water content [0-72cm] ( $S_f$ )	260.3	333.5		
Water content variation [0-72cm] ( $\Delta S = S_f - S_0$ )	87.1	57.0	16.0	6.9
Drainage water [0-72cm] ( $D_t$ )	2.2	1.5	0.4	0.2
Water loss (infiltration flux below 72 cm level and lateral flux) ( $I - \Delta S - D_t$ )	35.3	24.5	6.5	3.0

Soil hydraulic conductivity decreased with depth in both the plots (Fig. 4). The main difference between the plots was found at the 25 cm layer which the mode class is  $14\text{-}16 \text{ mm h}^{-1}$  for plot 1 and  $0\text{-}4 \text{ mm h}^{-1}$  for plot 2. For the 50 cm deep layer of plot 1, the  $16\text{-}20 \text{ mm.h}^{-1}$  class was still valid, while for plot 2 the only valid class was  $0\text{-}4 \text{ mm h}^{-1}$ . The infiltrometer measurements carried out layer by layer are in accordance with the infiltration curves obtained by rainfall simulation for the assumption that hydraulic conductivity is independent of water content.

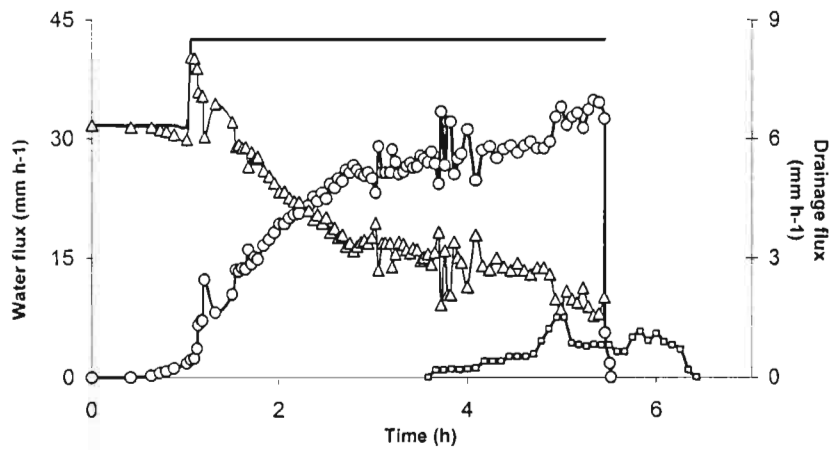


Fig. 2 : Surface water and drainage fluxes in plot 1 during rainfall simulation: open triangle for infiltration rate ; open circle for runoff rate, full line for rainfall rate; open square for drainage rate.

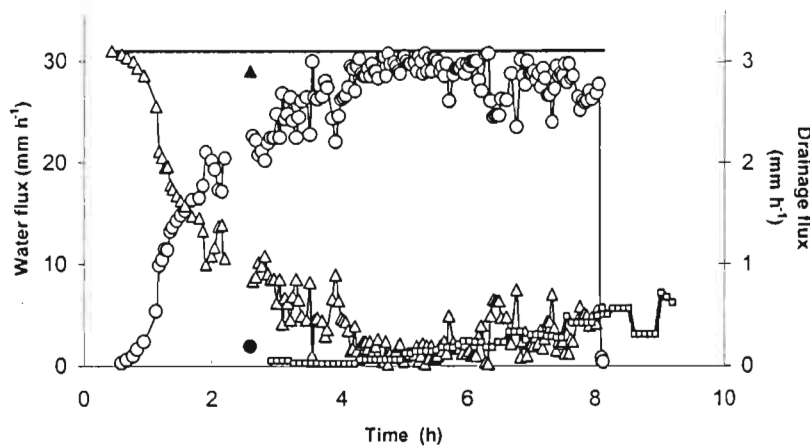


Fig. 3 : Surface water and drainage fluxes in plot 2 during rainfall simulation: open triangle for infiltration rate ; open circle for runoff rate, full line for rainfall rate; open square for drainage rate; full triangle for simulator disfunctioning.

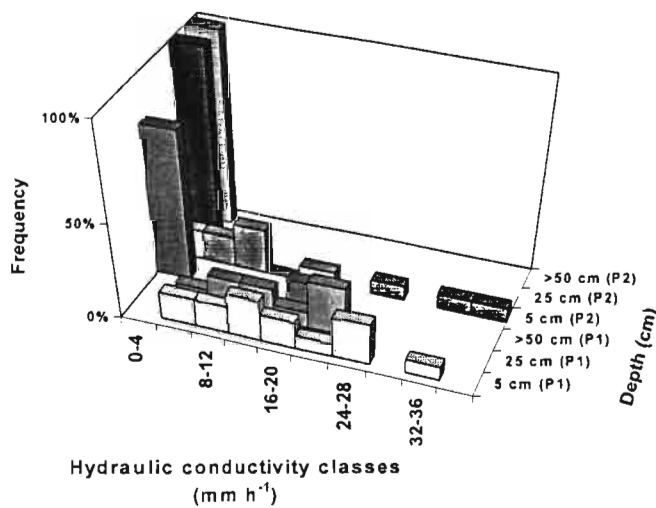


Fig. 4 : Hydraulic conductivity measurements in piping affected (plot 1) and non-piping affected (plot 2) plots

## Chemical behavior of solutions

For the runoff solution, the evolution of the electrical conductivity (EC) versus time (Fig. 5) shows a characteristic pattern already observed in saline soils of Mexico (Reyes, 1998). Initial value decreases and tends to be stabilized in relation with hydrologic behavior. After 2 h runoff, a weak linear downward trend is discerned for the 2 plots, even if, for plot 2, runoff evolution seems to stabilize. When rainfall stops, the last EC value is increasing. Observed EC values are higher for plot 2 ( $> 600 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) than for plot 1 ( $< 500 \mu\text{S cm}^{-1}$ ). The solute content of the runoff water leads to a thermodynamic saturation with respect to calcite and dolomite minerals and is in accordance with the  $\text{CO}_2$  partial pressure of a natural soil,  $\log(p\text{CO}_2)$  ranging from -2.69 to -2.45.

For the drainage solution, EC is about 10 times higher than EC in the runoff solution. EC evolution (Fig.5) do not show the same pattern for the two plots, even if mean solution salinity relies in the two cases on the depth of the artificial drainage pipe. For plot 1, EC values are weakly decreasing with time, this effect being more accentuated for the deepest solution. For plot 2, the EC curve versus time evolution is bell-shaped, the initial and final stages corresponding to the highest values. The drainage solution at 20 cm depth is oversaturated with respect to gypsum for both the plots. Sulfate content is increasing with depth while calcium and magnesium contents are identical,  $\text{CO}_2$  partial pressure being stable. Sodium and chloride contents are increasing with depth for the two plots (Table 2).

TABLE 2 : Chemical content and volume of reservoir, rainfall, runoff and drainage waters

Water type	pH	CE	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	Volume
		$\text{dS m}^{-1}$				$\text{mmol L}^{-1}$				$\text{m}^3$
<b>Reservoir water</b>										
28/09/94 <sup>1</sup>	-	-	0.7	21.2	5.1	11.2	3.0	18.7	0.7	14400
18/10/94 <sup>1</sup>	-	3.10	0.8	17.2	1.1	10.5	2.1	10.5	0.5	82400
04/04/95 <sup>1</sup>	-	4.06	1.9	23.4	2.3	12.5	6.0	17.5	0.5	68200
15/05/98 <sup>2</sup>	9.73	5.51	0.9	43.0	4.4	22.7	4.4	44.7	0.7	6000
<b>Experimental rainfall water</b>										
Rainfall water (stored in cement tank)	7.82	0.34	3.0	2.2	0.5	3.2	0.3	0.7	0.3	0.232 0.252
<b>Plot 1 (mean values)</b>										
Runoff water	7.71	0.48	3.2	4.5	0.9	5.2	0.8	0.8	0.3	0.107
Drainage water (20 cm)	7.76	3.28	2.8	45.5	1.0	33.3	8.5	11.0	0.3	
Drainage water (51 cm)	7.62	6.71	2.8	56.6	11.3	29.0	6.8	55.3	0.4	0.035
<b>Plot 2 (mean values)</b>										
Runoff water	7.87	0.71	3.2	8.6	0.9	8.9	1.3	0.8	0.3	0.169
Drainage water (20 cm)	7.57	8.44	3.2	54.8	35.6	32.0	12.2	59.7	0.4	
Drainage water (35 cm)	7.53	12.77	2.8	65.0	68.6	34.3	8.9	114.8	0.4	0.024

<sup>1</sup> after Rahaingomanana (1998) ; <sup>2</sup> after Montoroi et al. (2000); - for no measurement



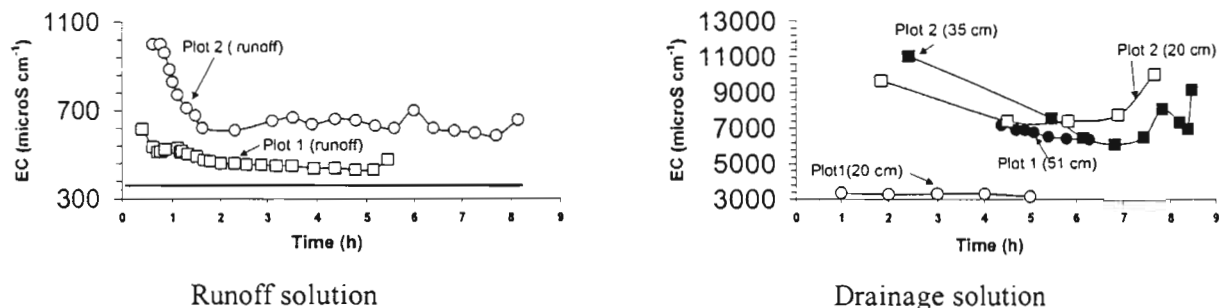


Fig 5 : Evolution of electrical conductivity (EC) versus time for runoff and drainage solutions during rainfall simulation.

### Comparison with reservoir water

The chemical quality of the reservoir water is influenced by the evaporation. The 18/10/94 date corresponds to the fullest reservoir stage which is assumed to be the more representative stage for the water quality generally reached by reservoir water before an evaporation period. We consider that the chloride content of the reservoir water ( $1.1 \text{ mmol L}^{-1}$ ) is the result of a perfect chemical mixing between direct runoff water, with a chloride content of  $0.9 \text{ mmol L}^{-1}$ , and hypodermic drainage water. For plot 1, the chloride content of the drainage water is  $11.3 \text{ mmol L}^{-1}$  and the contribution of this hypodermic flux to the mixing reservoir water is evaluated at 1.8% by computing. Applying the same procedure for plot 2 with a 20 cm deep drainage water containing  $35.6 \text{ mmol L}^{-1}$  of chloride, the proportion reaches 0.6%.

The sulfate content of the reservoir water being  $17.2 \text{ mmol L}^{-1}$  can be interpreted as the mixing of direct runoff water with a  $4.5 \text{ mmol L}^{-1}$  sulfate content and hypodermic (20 cm) drainage water with a  $45.5 \text{ mmol L}^{-1}$  for plot 1. This leads to a 30% contribution of hypodermic flux whereas, for plot 2, the contribution is about 24% with a 20 cm deep drainage water containing  $54.8 \text{ mmol L}^{-1}$  of chloride.

### CONCLUSION

The existence of a piping net with pipes, cavities, funnels and fissures implies the presence of free water at a depth of more than 60 cm. In the two rainfall plots, this condition could be reached when the cumulative infiltration amount was larger than 60 mm depending on the initial stage of the soil moisture in the superficial layers. Apparently, piping process takes place at few occasions and after various successive runoff events. In presence of piping phenomena, soil infiltration capacity is enhanced not only for the intermediate layer [20-40 cm] but also for deeper layers. In non-affected soil, the infiltration capacity of the deeper layer is negligible, whereas the likely flux to underground piping cavities is  $10 \text{ mm h}^{-1}$  (if the collapsed depressions are not taken in account).

The salinity of the runoff water is dependent on hydrological conditions but is stabilized after 1.5 h. The chemical content of the runoff water already respects the thermodynamic equilibrium with calcite, dolomite and soil  $\text{CO}_2$ . Drainage water oversaturates the thermodynamic equilibrium with gypsum. Therefore, the salinity contrast is mainly due to the chloride and sodium contents. A salinity stratification of the drainage water is observed in the soil profile. Water salinity evolution with time is drastically different in the two experiment plots: for plot 1 affected by piping, EC is weakly decreasing which is in accordance with a leaching process, whereas, for the non-affected plot 2, after a previous decrease period, EC is increasing by a concentration process due to the infiltration drop in depth.

The chloride content of the reservoir water, at the fullest stage, is very similar to the chloride content of the runoff water which signifies that the dissolution of the Cl-rich minerals by drainage water is negligible. In turn, calculation based on the sulfate contents of the reservoir water, the runoff water and the 20 cm drainage water show that drainage water has a significant contribution, ranging from 24 to 30%, to the mixing reservoir water, the gypsum dissolution being a relevant process.

## REFERENCES

- ALBERGEL J., REJEB N., 1997. Les Lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 83, 2, 77-88.
- COLLINET J., ZANTE P. 1999 Carte pédologique du bassin versant de Fidh Ali à l'échelle du 1/20000. IRD, Tunis, 15 p.
- GUTIERREZ ELORZA M., GutiérRez SANTOLALLA F., 1998. Geomorphology of the Tertiary gypsum formations in the Ebro depression (Spain). *Geoderma*, 87, 1-29.
- MONTOROI J.P., GRÜNBERGER O., NASRI S., 2000. Caractérisation chimique et isotopique des eaux et des formations superficielles du bassin versant du lac collinaire d'El Gouazine (Tunisie centrale). Rapport scientifique de la campagne de mesures 1998. Multigr., Ird/Dces/Inrgref, Bondy, 107 p.
- REYES GOMEZ V., 1998. Dinamica de sales con simulacion de lluvia en suelos salinos del norte arido de Mexico. Tesis de Maestria, Colegio de postgraduados, Montecillo, Mexico, 121p.
- RAHAINGOMANANA N., 1998. Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore. Thèse de Doctorat, Université Montpellier, 311 p.
- TRUESDELL A.H., JONES B.F., 1974. Wateq a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. *J. Research U.S. Survey*, 2, 233-248.
- ZNANG R., 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 1024-1030.



# COMPOSITION OF ERODED SOIL UNDER VARIOUS GRAZING INTENSITIES IN MEDITERRANEAN GRASSLAND

Hellali H.\* and Nastis\*\* A. S.

\* Engineer in Soil and Water Conservation, M.Sc. (Ministère de l'Agriculture, D/CES Tunis).

\*\* Professor, Department of Range and Wildlife Sciences, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

## ABSTRACT

Soil particle composition of the runoff was evaluated in a Mediterranean grassland under a short duration grazing system, with three intensity levels and a control. Three replicate-plots for each treatment and three repeated measurements, fifteen days apart from each other were taken. Soil particle transport was measured by bordering test plots, under a 140 mm/hr simulated rainfall for 30 min and collecting the runoff. Soil particles in the runoff were sampled every 5 min of rainfall application.

There were no significant differences for floating elements, fine elements ( $P \leq 0.05$ ) as well as for coarse elements between the control, the light and the moderate grazing intensity. However, all measured classes of soil particles were found to be significantly ( $P \leq 0.05$ ) higher for the high intensity grazing treatment, up to five folds from those of the moderate stoking treatment. This phenomenon is due mainly to the removal of the protective vegetation cover, which was reduced for the light intensity by 20%, the moderate intensity by 35% and the heavy intensity by 56% in comparison to the control.

In addition, heavy grazing although not statistically significant had an impact on soil structural stability facilitating its particle detachment and removal by the increased runoff.

## INTRODUCTION

In arid and semi-arid Mediterranean zone most rangelands suffer a continuous decline in their soil fertility, while most of its richness is being lost by overland flow. The limited soil fertility can not maintain a dense vegetation cover especially where soil depth is limited. Moreover, rainfall pattern is in the form of infrequent heavy storms where most of the water finds its way to streams and rivers through the process of overland flow whenever the vegetation cover is sparse and inadequate to effectively protect soil particles detachment.

Rangeland ecosystems occupy a major part from the earth's land surface. More than 80 percent of these rangelands constituting around 40 percent of the worlds land surface exist within the arid and semi-arid zones (Branson et al., 1972). In the mediterranean zone, rangelands occupy more than 27 million hectares (Le Houerou, 1981). In Greece rangelands cover an area of 5.2 million hectares, where an important part of it (30%) is present (Papanastasis and Noitsakis, 1993) as grassland ecosystem. A considerable part of these grasslands is facing serious problems of degradation due to the effect of uncontrolled grazing (Tsiouvaras et al., 1995; Arianoutsou-Fraggitaki, 1985).

The objective of this study was to investigate the relation of grazing intensity to the composition of the eroded soil for a semi-arid rangeland environment. In this context, grazing was applied with three levels of vegetation use. Sediment fractions were measured under simulated rainfall.

## EXPERIMENTAL AREA

The study was conducted in the Research rangeland of Chrysopighi, Macedonia, Northern Greece (41° 15 north latitude and 23° 27'58 east longitude). This site is located at an elevation of 650 m a.s.l. and its drainage area is of around 50 ha. The topography of this land is highly irregular with moderate to steep slopes. Its climate is characterised by an average annual precipitation of 640 mm and a mean temperature of 13°C. Using the climatic data collected from 1978 to 1995 for the climatic diagram (Emberger, 1942) the site was identified as having a sub-humid climate with cold winters. Most of the precipitation occurs from early autumn until late spring. Following the ecological classification system established by Walter (1973), the study area lies within the Mediterranean sclerophyllous zone (Tsiouvaras, 1987).

The soils are of medium depth with slight acidity ( $\text{PH}_{\text{KCl}} = 5$ ). Geologically these soils are derived from conglomerates of the tertiary period (sea deposits). The texture was found to be sandy loamy in the first 15 cm surface layer to clay sandy loamy in the below layers Tsiouvaras (1984).

Within the study site the vegetation can be classified in three groups. 1) Grasses: *Dactylis glomerata*, *Festuca ovina*, *Phleum phleoides*, *Chrysopogon gryllus*, *Dichanthium ischemum*. 2) Legumes: *Trifolium hirtum*, *Trifolium campestre*, *Trifolium purpureum*, *Trifolium arvense*, *Vicia cracca* and 3) Woody species: *Quercus coccifera*, *Quercus pubescence*, *Quercus sessiliflora*, *Carpinus orientalis*, *Fraxinus ornus* (Yiakoylaki and Nastis, 1993). If not grazed the vegetation cover reaches 85 to 95%.

## MATERIALS AND METHODS

Based on the homogeneity of vegetation (herbaceous vegetation), soil characteristics, and regular moderate slope of 20 percent, a grassland site of one-acre surface area was selected for runoff plots establishment. Within this site Three plots were established. Within each plot three subplots, of 8.7 m<sup>2</sup> surface area each, were delimited. By the beginning of January 1997 all plots were fenced to exclude grazing. Thereafter, three grazing treatments were applied by the beginning of May 1997 to fenced plots namely.

- 1) Short-duration light grazing (SLG): leaving 65 to 80 percent vegetation cover;
- 2) Short-duration moderate grazing (SMG) : leaving 50 to 65 percent vegetation cover; and
- 3) Short-duration heavy grazing (SHG): leaving 30 to 45 percent vegetation cover.

Immediately prior to the application of grazing treatments, the vegetation cover in plots was exceeding 85 percent. Therefore, for comparative purposes and to simulate the control treatment (treatment where grazing was excluded) simulated rainfall was applied to all plots with an intensity of 140mm/hr for a duration of 30 minutes over each subplot. Few days later, to avoid the effect of trampling on wet soil, each fenced plots received a defined intensity of Short-duration grazing. Vegetation cover was checked carefully during the grazing time. Thereafter, once the vegetation cover within the plots reached the desired level, simulated rain was applied to the plots with three repetitions. Water runoff and soil losses were measured during every rainfall application..

While applying the grazing treatments, the vegetation cover was carefully checked using the point frame method (Cook and Stubbendieck, 1986) with five repetitions within each plot.

Immediately prior to the rainfall application, two soil samples were obtained adjacent to each subplot in the first tow inches soil layer using the excavation method (Blake, 1965). At the same time two adjacent quadrates to each subplot 17.5 by 17.5 cm<sup>2</sup> in size were selected from which vegetation and litter were collected. Collected samples were oven dried for 24 hrs at 105°C and then weighed.

Water runoff was collected in 12 litres containers at five minutes intervals from the starting of the rainfall application and the volume was recorded. Every 10 minutes rainfall application a 0.10 litre water runoff was sampled in small bottles carried to the laboratory for sediments estimation.

Water samples were transferred into 0.150 litre cylinders, left for suspended elements to settle down and then filtered using Whatman 41 filter papers. The floating elements (litter) were siphoned and filtered.

Immediately after eliminating the floating elements, the cylinders were closed by a rubber stopper and turned upside-down for 20 times and then the content was passed through a 63 micrometers sieve. Two more fractions were then separated. Fine elements with diameter less than 63 micrometers and coarse elements with larger diameter. The two fractions were filtered and oven dried overnight at 105°C and weighed.

Data related to water runoff and soil erosion were analysed as completely randomised design (Snedecor and Cochran, 1971). Grouping to separate main effects was performed using Duncan multiple test (Steel and Torrie, 1960). Only differences between means at the  $P \leq 0.05$  of probability were considered significant.

## RESULTS AND DISCUSSION

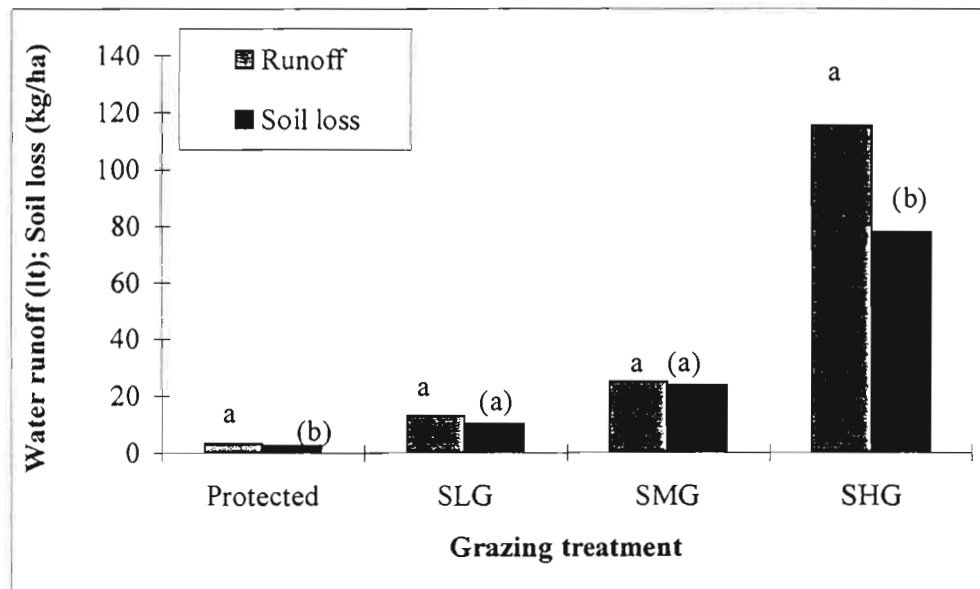
The only parameters which were affected significantly by short duration grazing treatments were vegetation cover and biomass weight since these two were prime determinants of the grazing treatments in our study. However, for all other parameters no significant effects were recorded for any of the grazing intensities applied and this is probably due to the short term investigation applied in this study.

Cumulative eroded soil and water runoff for the 30 minutes period were significantly higher ( $P \leq 0.05$ ) under SHG than under SMG and SLG (Figure 1) which was consistent with Wood and Blackburn (1981). Excluded grazing (control), SMG and SLG were not statistically different ( $P \leq 0.05$ ) in causing runoff and soil erosion (Fig. 1). Total eroded soil ranged from a maximum of 115.6 kg/ha under IHG, accounting to 75% of the total eroded soil under the tree grazing intensities, to a minimum of 13.0 kg/ha under ILG which accounts only to 6% of the erosion caused by the intermittent grazing treatments. These averages of soil loss were considerably low compared to the limits given by Wischmeier and Smith (1978) considering an amount of 4,500 to 11,000 kg/ha sediments production to be in the environmentally acceptable range.

TABLE 1 : Mean values of vegetation cover (%), litter weight (t/ha), biomass weight (t/ha) and soil bulk density (g/cm<sup>3</sup>) measured under various grazing treatment, where (SHG = Short duration heavy grazing; SMG = Short duration moderate grazing; SLG = Short duration light grazing; Protected = control or excluded grazing).

Variable	Protected	SLG	SMG	SHG
Vegetation cover	87.06 <sup>a1</sup>	69.41 <sup>b</sup>	56.73 <sup>c</sup>	38.44 <sup>d</sup>
Litter weight	7.87 <sup>a</sup>	7.57 <sup>a</sup>	8.22 <sup>a</sup>	7.87 <sup>a</sup>
biomass weight	8.11 <sup>a</sup>	4.56 <sup>b</sup>	2.64 <sup>b</sup>	2.11 <sup>b</sup>
soil bulk density	1.01 <sup>a</sup>	1.05 <sup>a</sup>	1.07 <sup>a</sup>	1.11 <sup>a</sup>

Soil loss composition for the three short duration grazing intensities (Table 2) indicated the effectiveness of grazing pressure in causing erosion, since the yields of separated elements (floating elements, fine elements and coarse elements) were significantly higher for SHG compared to all other treatments.



Columns with the same letter (in parenthesis) are not significantly different.

Fig. 1 : Cumulative soil loss and water runoff over the 30 minutes duration of rainfall application under various grazing intensities where (SHG = Short duration heavy grazing; SMG = Short duration moderate grazing; SLG = Short duration light grazing; Protected = control or excluded grazing).

Again, no significant differences for any of the separated elements existed among SLG, SMG and the treatment where grazing was excluded. This confirms finding of Hellali (1997) who proved that within the same site and for a vegetation cover lower than a critical value (50%) soil erosion increased drastically.

In figure 2, and for the SLG treatment, the highest proportion of soil loss was present as floating elements. The assumption was that during the first few minutes flowing water on the soil surface is only transporting free soil particles which decreased with the duration of rainfall application up to the last ten minutes interval during which the proportion of floating elements started to dominate again. The decreased proportion of floating elements under SLG was followed by an increase in the proportion of coarse sediments while the proportion of fine elements was maintained at an almost constant rate. The reduction in the proportion of floating elements, during the second ten minutes of rainfall application (Figure 2), may be attributed to the decline in runoff production since the infiltration rate was increased. The reduced runoff was unable to carry floating elements because the easily removed elements have been already transported. Later when runoff increased coarse sediments were displaced by rolling (Ellison, 1947). The increased proportion of floating elements during the last ten minutes is confirming the previous assumption since water runoff tended to increase during the last five minutes period. Fine sediments were maintained at a low proportion because of the inability of mild water runoff to detach fine elements efficiently bounded by the organic matter.

TABLE 2 : Yields of floating elements (A), fine elements (B) and coarse elements (C) in kg/ha collected at 10 minutes intervals of rainfall application under various grazing treatments. Where SHG = Short duration heavy grazing; SHG = Short duration moderate grazing; SHG = Short duration light grazing; Protected = control or excluded grazing.

Soil loss fractions	Time intervals	Protected	SLG	SMG	SHG
A	0-10 min	0.61 <sup>a(z)l</sup>	2.21 <sup>a(z)</sup>	2.80 <sup>a(z)</sup>	7.86 <sup>b(z)</sup>
	10-20 min	0.11 <sup>a(z)</sup>	1.50 <sup>a(z)</sup>	2.21 <sup>a(z)</sup>	16.06 <sup>b(y)</sup>
	20-30 min	0.40 <sup>a(z)</sup>	1.06 <sup>a(z)</sup>	2.22 <sup>a(z)</sup>	14.63 <sup>b(y)</sup>
B	0-10 min	0.77 <sup>a(y)</sup>	1.52 <sup>a(z)</sup>	3.53 <sup>a(z)</sup>	7.73 <sup>b(z)</sup>
	10-20 min	0.33 <sup>a(z)</sup>	1.48 <sup>a(z)</sup>	3.81 <sup>a(z)</sup>	16.38 <sup>b(y)</sup>
	20-30 min	0.17 <sup>a(z)</sup>	0.94 <sup>a(z)</sup>	2.12 <sup>a(z)</sup>	17.18 <sup>b(y)</sup>
C	0-10 min	0.64 <sup>a(z)</sup>	1.57 <sup>a(z)</sup>	2.43 <sup>a(z)</sup>	7.17 <sup>b(z)</sup>
	10-20 min	0.08 <sup>a(z)</sup>	1.96 <sup>a(z)</sup>	3.29 <sup>a(z)</sup>	14.37 <sup>b(y)</sup>
	20-30 min	0.27 <sup>a(z)</sup>	0.77 <sup>a(z)</sup>	2.54 <sup>a(z)</sup>	14.22 <sup>b(y)</sup>

l Means followed with the same letter within the same row or column (in parenthesis) is not significantly different ( $P \leq 0.05$ ).

Under the SMG treatment, during the first few minutes and up to the last ten minutes interval of rainfall application, fine sediments were composing most of the soil loss, followed by the floating elements (Figure 2). Thereafter, a remarkable drop in the proportion of fine sediments was encountered accompanied by an increase in the proportion of coarse sediments but also of floating elements which started to dominate the composition. The proportion of floating elements dropped to its minimum value within the second ten minutes interval and then started to increase in the following time interval probably as a result of the increased rate of water runoff. The high proportion of fine elements for the SMG treatment during the first few minutes of rainfall application compared to the last ten minutes (Table 2) is due perhaps to the modification of the soil structure through animal's trampling which desaggregated the soil and detached fine material being available for the moving force of water runoff.

Soil loss composition under SHG (Figure 2) was not affected by the duration of rainfall application up to the last ten minutes interval when the proportion of fine elements increased to dominate over the remaining two fractions. The increased proportion of fine elements within the last ten minutes rainfall application indicated the ability water runoff acquired in detaching and transporting fine elements while being still unable to set in motion coarser soil particles.

According to the above, it seems that the proportion of a given element in the total eroded soil, does not depend only on the duration of rainfall application, although it is well established (Lang and McCaffery, 1984) that the longer the duration of rainfall the higher the water runoff amount and velocity. Such an

increase in the amount and speed communicates to water runoff the ability to set in motion and mobilise greater quantities of coarser materials. However, the proportion of an element, in the total soil loss, depends first of all on its availability on the land and on its transportability by water runoff.

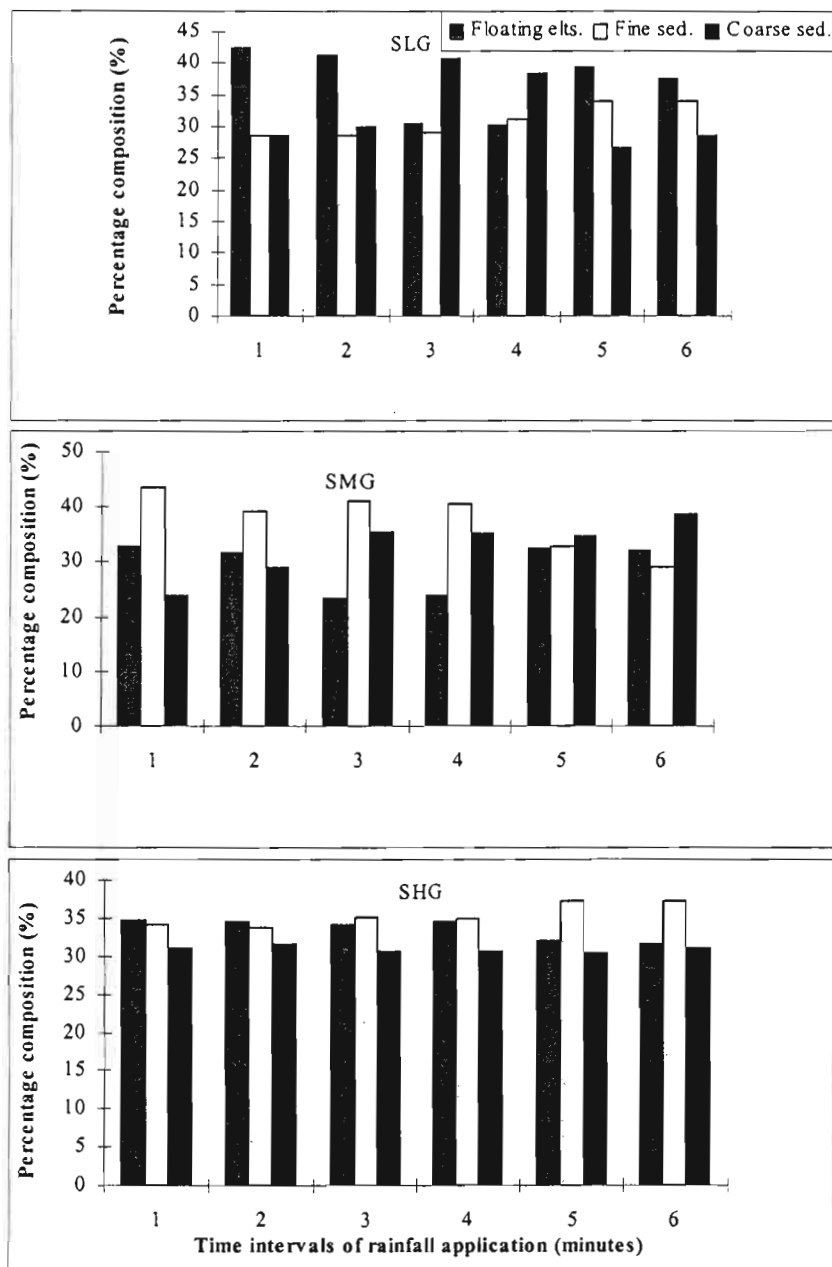


Fig. 2 : Composition of soil loss at various time intervals under various short duration grazing intensities. Where (SHG = Short duration heavy grazing; SMG = Short duration moderate grazing; SLG = Short duration light grazing).

Under all the grazing intensities tested, floating elements were forming almost 30 percent of the total weight of eroded elements. Nevertheless, the proportion of floating elements most probably was slightly higher than that measured. Floating elements having sizes bigger than 2 cm could not pass through the plastic pipe carrying the water runoff from the plot to the collecting trough. The error encountered was estimated to be relatively small. In order to avoid even this small error, the transporting pipe has to be larger in diameter.



## CONCLUSIONS

It can be concluded that the proportion of an element in the eroded soil depend first of all on its availability and its size as well as on the kinetic energy of the overland flow. However, this kinetic energy can be reduced by the standing vegetation lowering in turn the detaching and transporting abilities of the running water. Since this study was established at a micro-scale, it is recommended a further investigation to examine this phenomenon at the watershed scale so to provide ranchers with suitable data to avoid excessive use of the vegetation and secure the effects on soil at the long run.

## ACKNOWLEDGMENT

The financial support in carrying out this study of the European Union (FAIR-CT 95-48) is gratefully acknowledged.

## REFERENCES

- ARIANOUTSOU-FRAGGITAKI M. 1985 Desertification by overgrazing in Greece: The case of Lesbos island. *J. Arid Envir.* 9: 237-242.
- BLAKE, G. F. 1965. Bulk density. In: C. A. Bla(ed.) *Methods of Soil Analysis*. Amer. Soc. of Agron. Series N9. Madison. 1572 p.
- BRANSON, F. A., GIFFORD G. F., and OWEN J. R. 1972. Rangeland hydrology. In: *Range Sci. Series N°1*. Soci. Range Manage. Denver, Colorado. 84p.
- COOK, C. W., and STUBBENDIECK J. 1986. Methods of studying vegetation. In: C. W. Cook and J. Stubbendieck (eds.). *Range Research: Basic Problems and Techniques*. Soc. Range Manage. Jostens, Broomfield, Colorado. pp. 51-71
- COSTIN, A. B. 1980. Runoff and soil and nutrients loss from an improved pasture at Guinninderra, southern Tablelands, New south Wales. *Aus. J. Agri. Res.* 31: 533-546.
- ELLISON, W. D. 1947. Soil erosion. *Soil Sci. Soci. Amer. Proceedings*. 12: 479-484.
- EMBERGER, L. 1942. Un projet d'une classification des climats du point de vue phytogeographique. *Bul. Soc. D'Histoire Naurelle de Toulouse*. 77: 97-124.
- HELLALI H. 1997. Impact of grazing on water runoff and soil erosion from a sandy-loamy grassland. M.Sc. thesis. Med. Agron. Inst. Chania (CIHEAM) 105 p.
- LANG, R. D., and MCCAFFEREY L. A. H. 1984. Ground cover: its effects on soil loss from grazed runoff plots, Gunnedah. *J. Soil and Wter Conserv.* 40: 56-61.
- LE HOUEROU, H. N. 1981. Impact of man and his animals on Mediterranean vegetation. In: F. Dicastri, D. W. Goodall and R. L. Specht (eds.), *Ecosystem of the world, 11: Mediterranean type shrublands*. Elsevier, New York. pp. 479-521.
- PAPANASTASIS, V. p., and NOITSAKIS B. 1993. Range ecology. Giachoudis Pub. Co. Thessaloniki (in Greek)
- SNEDECOR, C. W., and COCHRAN W. C. 1971. *Statistical Methods*. The Iowa state University Press, Ames. Iowa. 593p.
- STEEL, R. G. D., and TORRIE J. H. 1960. *Principles and Procedures of Statistics*. McGraw-Hill Book company, Inc. New York. 481p.
- TSIOUVARAS C. N., KOUKOURA Z., AINALIS A., and PLATIS P. 1995. Effects of grazing intensity on the cover, composition and herbage production in a semiarid grassland in Macedonia, Greece. In: N. P. Zervas and J. Hatziminaoglou (eds.) *Proc. Intern. Symp. "The optimal exploitation of marginal Mediterranean areas by extensive ruminant production systems"*. 376-378 pp.
- TSIOUVARAS C. N. 1987. Ecology and management of kermes oak (*Quercus coccifera* L.) shrublands in Greece: A review. *J. Range Manage.* 40: 542-546.
- TSIOUVARAS C. N. 1984. Effect of various clipping intensities on browse production and nutritive value of kermes oak (*Quercus coccifera* L.). PhD Diss. School of Forestry, Aristotelio Univ. Of Thessaloniki, Greece. 110p. ((in Greek with English summary).
- WALTER, H. 1973. *Vegetation of the earth*. Springer-Verlag, New York, 237p.
- WISCHMEIER, W. H., and SMITH D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. *US Dep. Agri. Sci. Edu. Admin. Agri. Handbook N° 537*. 58p.
- WOOD, M. K., and BLACKBURN W. H. 1981. Sediment production as influenced by grazing in the Texas rolling plains. *J. Range Manage.* 34: 228-231.
- YAKOYLAKI D. M., and NASTIS A. S. 1993. Mineral content of selected forage species common in the Mediterranean shrublands. *REUR Technical Series FAO, Rome*. pp. 137-141.

# FRactal Theory to Simulate Unsaturated Transport Properties

Persson M.\*, Olsson J.\*\*, Albergel J.\*\*\*, Zante P.\*\*\*, Nasri S.\*\*\*\*, Yasuda H.\*\*\*\*\*, Berndtsson R.\* and Öhrström P.\*

\* Lund University, Lund, Sweden

\*\* Institute of Environmental Systems, Kyushu University, Fukuoka, Japan

\*\*\* Institut de Recherche pour le Développement, Tunis, Tunisia

\*\*\*\* Institut National de Recherche du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Tunis, Tunisia

\*\*\*\*\* Tsukuba University, Japan,

## ABSTRACT

We investigate fractal characteristics of solute transport as viewed from dye experiments. Experiments performed within the EU-sponsored research HYDROMED (a research program on hill reservoirs in the semiarid Mediterranean periphery) are used to test two different fractal model concepts; the diffusion limited aggregation and the random cascade model. Solute transport properties as indicated from dye coverage experiments displayed fractal properties as viewed by power spectrum analyses and probability distribution characteristics. The diffusion limited aggregation model was calibrated and verified for two plots. The verified model agreed very well to observed data. The random cascade model was calibrated for one experimental plot. Some over-estimation appeared to be the case. However, the general spatial pattern appeared to agree well with observed data. It remains to perform a rigid statistical test for the performance of the random cascade model.

## INTRODUCTION

Field properties of preferential pathways for water and solutes are still not well understood (e.g., Booltink and Bouma, 1991; Bouma, 1991). Due to this and an increasing awareness of its importance for groundwater and general environmental quality, preferential flow at unsaturated field conditions has become an increasingly important research issue (e.g., Beven and Germann, 1982; Hillel, 1991). A reason for observed discrepancy between field scale transport and results from homogeneous media assumption may be that our tools of observation at field scale are not yet detailed enough to yield information at the relevant scales. Often it is the complicated three-dimensional flow structures at micro-scale that determines the actually observed field scale variation.

A technique to investigate actual field scale transport patterns at micro-scale may be to use dye tracers (e.g., Flury et al., 1994). Images of dyed soil transects provide an excellent resolution at the spatial scale. However, they usually give no information at the temporal scale. Dye data, however, may lead to the development of new model concepts that more accurately can depict complicated spatial patterns of solute transport (e.g., Schwartz et al., 1999).

A possible way to consider scaling in soil transport properties as well as modeling the observed dye formations may be to use fractal theory. Fractal patterns or soil properties are often observed at the field scale for related subsurface transport (e.g., Feder, 1988; Kemblowski and Wen, 1993; Baveye et al., 1998). Similarly, fractal transport models have been developed by several researchers (e.g., Wheatcraft and Tyler, 1988; Flury and Flühler, 1995; Mukhopadhyay and Cushman, 1998; Pachepsky and Timlin, 1998).

In the present paper we investigate fractal properties of observed dyed soil transect images at field conditions. Experimental data from an ongoing European Union cooperation (HYDROMED, a research program on hill reservoirs in the semiarid Mediterranean periphery) were used within this study (see e.g., Öhrström et al., 2000). We use the data to indicate fractal properties and also to test two different fractal models to generate observed properties; diffusion-limited aggregation and random cascade process. We close with a discussion on further development.

## MATERIALS AND METHODS

### Theory

#### Diffusion-limited aggregation (DLA)

Witten and Sander (1981) introduced this model concept already two decades ago. An advantage is that the DLA model can generate fractal transport patterns (e.g., Flury and Flühler, 1995; Meakin, 1991). In general, the DLA model generates spatial clusters of the solute by randomly walking particles. Particles are randomly generated from a line source at some distance below the soil surface. By random walk the particles may finally reach up to the line seed (soil surface). When the particles reach the seed they become part of the seed and remain attached at that position (Flury and Flühler, 1995). New particles that reach the seed permanently attach and form a gradually increasing cluster. The process can be halted once some pre-defined maximum depth is reached by the growing cluster  $z_{max}$ . The randomly walking particle can consequently move in four directions depending on probabilities,  $P_u$ ,  $P_d$ ,  $P_r$ , and  $P_l$ , corresponding to upward, downward, right and left walk in the two-dimensional grid, respectively.

$$P_u + P_d + P_r + P_l = 1.0 \quad (1)$$

An isotropic random walk model has the following probability distribution:

$$P_u = P_d = P_r = P_l = 0.25 \quad (2)$$

By changing these probabilities, anisotropic conditions may be simulated. Also, layered soils may be simulated by including different walking probabilities for different soil depths (see further e.g., Flury and Flühler, 1995). The DLA model should be seen as a conceptual model within the microscale. Therefore, output from the DLA model has to be averaged over a suitable space in order to be comparable to the scale of observations (see further Persson et al., 2000).

#### Random cascade process

Dyed soil transects may also be modeled within a multifractal framework. In terms of statistical moments, scaling implies that for the random field  $R(\mathbf{x})$  the average  $q$ th order moment of the coarse-grained field  $R_\lambda$  relates to the coarse-graining scale  $\lambda$  as

$$\langle R_\lambda^q \rangle \propto \lambda^{-K(q)} \quad (3)$$

where angle brackets denote (ensemble) averaging. Coarse-graining means decreasing the resolution of the field by taking spatial averages over non-overlapping squares of side  $\lambda$  (see, e.g., Davis et al., 1994). If the function  $K(q)$ , which essentially represents an infinite hierarchy of fractal dimensions, is nonlinear (convex) the data can be described as multifractal (Frisch and Parisi, 1985). The multifractal behavior as expressed by (3) is related to the exponents obtained from probability density functions and spectral analyses. According to, e.g., Mandelbrot (1974), for  $q > q_{cr}$   $K(q)$  becomes linear due to the divergence of moments. It should, however, be mentioned that an asymptotically linear  $K(q)$ -function has also been deduced as a general property of scaling (or self-similar) fields (Menabde et al., 1997). Further, for (3) to be valid it is required that  $\beta$  is less than the Euclidean dimension of the observed space, i.e.,  $\beta < 2$  for spatial fields (e.g., Menabde et al., 1997).

Assuming an underlying multiplicative cascade process with a Lévy-distributed generator Schertzer and Lovejoy (1987) parameterized  $K(q)$ . In a multiplicative cascade process, the investigated quantity is transferred to successively smaller scales by means of multiplicative weights, and the generator specifies the statistical distribution of these weights (see e.g., Davis et al., 1994). The approach of Schertzer and Lovejoy (1987) was termed a ‘universal multifractal model’ in which  $K(q)$  is expressed as

$$K(q) = \begin{cases} \frac{C_1(q^\alpha - q)}{\alpha - 1} & \alpha \neq 1 \\ C_1 q \log(q) & \alpha = 1 \end{cases} \quad (4)$$

where  $\alpha$  and  $C_1$  characterize the Lévy-distribution. The parameters may also be interpreted in fractal terms;  $\alpha$  specifies the degree of multifractality and  $C_1$  characterizes the fractal behavior of the mean process. A method known as ‘double trace moments’ may be employed for parameter estimation (e.g., Lavallée, 1991; Tessier et al., 1993). For a field  $R$  transformed into  $R^\eta$ ,  $K(q)$  becomes  $K(q, \eta)$  and these two functions are related as

$$K(q, \eta) = \eta^\alpha K(q) \quad (5)$$

which means that  $\alpha$  may be estimated by plotting  $K(q, \eta)$  as a function of  $\eta$  in a log-log diagram. With a known  $\alpha$ ,  $C_1$  may be estimated using (4) by  $K(q) = K(q, 1)$ . It is possible to check the validity of the estimated parameters by comparing (4), e.g., with the 95% confidence interval of the empirical  $K(q)$ -functions.

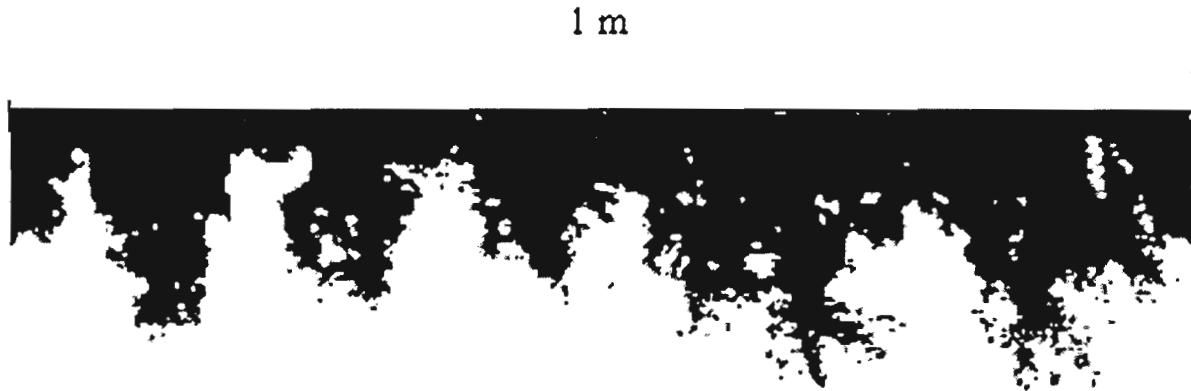
In the universal multifractal model, the deviation from conservation is specified by the parameter  $H$  given by

$$H = \frac{\beta - (1 - K(2))}{2} = \frac{\beta - 1}{2} + \frac{C_1(2^\alpha - 2)}{2(\alpha - 1)} \quad (6)$$

which is an estimation of the power law filtering exponent required to obtain conservation (e.g., Tessier et al., 1993).

## Experimental data

Experimental data from an ongoing European Union cooperation (HYDROMED, a research program on hill reservoirs in the semiarid Mediterranean periphery) were used within this study (see Öhrström et al., 2000). Experiments were conducted in the M'Richet el Anze catchment located 110 km southwest of Tunis in Tunisia. At the time of experiments (October 1996) the soils lay fallow. The average amount of rainfall in the area is 455 mm per year and the yearly average temperature is 16.6 °C. The soil may be described as a Typic Xerochrepts according to the classification of Soil Survey Staff (1996).



*Fig. 1: Example of a dye image from plot 1.*

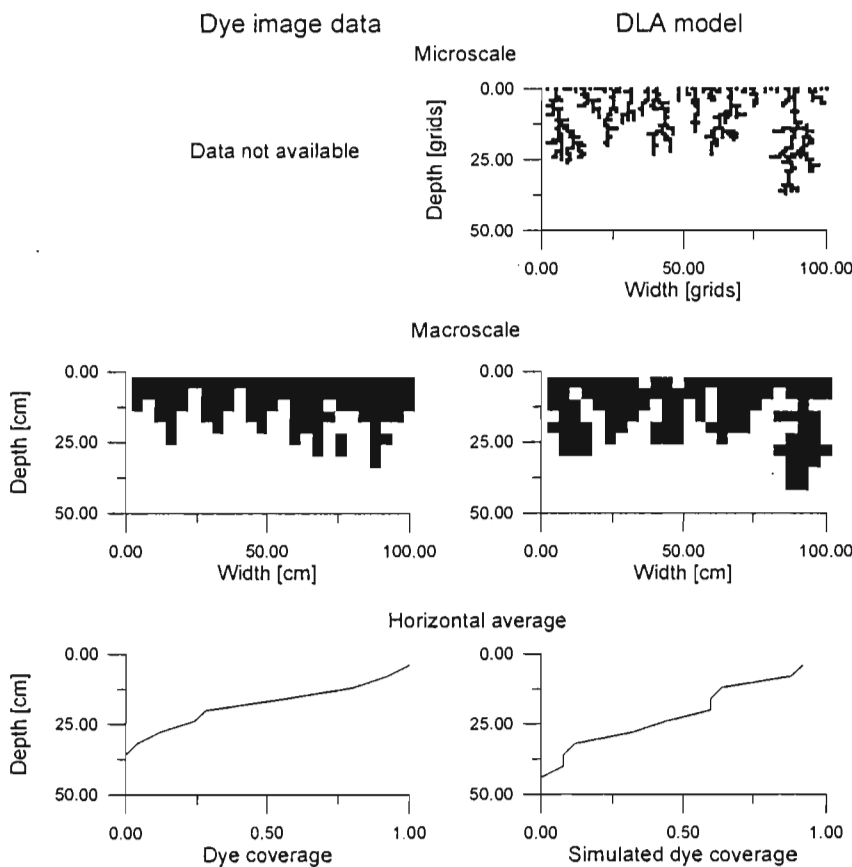
At six plots, within a small catchment, dye stained water was applied. The tracer used was food-grade dye pigment Vitasyn-Blau AE 85 (Swedish Hoechst Ltd.), similar to the more commonly used Brilliant Blue. This dye has been used in several field experiments due to its good visibility, low toxicity, and weak adsorption on soils (e.g. Flury et al., 1994; Aebly et al., 1997). A rainfall simulator (Bernard, 1987) was used to simulate a heavy rainstorm during about 1.5 hrs over 1.0 m<sup>2</sup>. Placing an iron frame of size 1 by 1 m at each site created the 1.0 m<sup>2</sup> plots. In order to avoid border effects, totally about 9 m<sup>2</sup> were covered by the rainfall simulator. Surface runoff was collected through a discharge weir in the iron frame. A total of about 45 mm were infiltrated at each plot. The surface plots did not contain any visible vegetation and the soil surface was homogenized down to depth of 2 cm. After the simulations, the plot was covered to avoid evaporation. About 24 hrs after the rainfall, a trench was dug and vertical sections of 2.5 cm thickness were excavated, resulting in 41 sections at each plot. Photos were taken of the vertical sections by a 35-mm camera with Kodachrome 64 film. The color photos were converted to black and white images by use of the Adobe Photoshop™ (version 4.0, Adobe Systems, Inc.) software (Fig. 1). The resolution of the converted black and white images corresponded to a pixel size of 0.14 cm. However, when the images were compared to the DLA model simulation, they were re-scaled to a pixel size of 4 by 4 cm. This leads to a lower resolution, however, the horizontal average of the dye structures did not change significantly with the pixel size.

## RESULTS

### DLA model simulations

Initial tests for fractal behavior of the data were performed by power spectrum analyses and probability distributions (see Olsson et al., 2000). The power spectrum typically displayed power-law behavior extending over the entire frequency range. The probability distribution analyses displayed a hyperbolic tail for the majority of the plots. Consequently, both analyses indicate a fractal behavior.

Figure 2 shows an example of the general procedure to use the DLA model concept and the comparison to dye images. It should be noted that the DLA is a stochastic model that gives a randomly varying output. Therefore, individual model outputs and observations can not be compared directly. Instead, statistical properties of model output and observations have to be compared. This is seen in Fig. 3, which shows a comparison between average and standard deviation of dye coverage with depth for simulations using the calibrated DLA and observations at plots 1 and 2.



*Fig. 2: Example of DLA model concept and a comparison between model results and observations. Note that the macroscale dye image data was calculated from the dye image shown in Fig. 1.*

As seen from the figure model results and observations agree well between the average dye penetration and the average of 369 DLA model realizations. To test the DLA model against independent data the calibrated model was verified using data from plot 2. This is seen in Fig. 3 showing a comparison between simulated and observed dye coverage with depth. Here, it should be stressed that model parameters were kept constant and no information from plot 2 other than the distribution of maximum dye penetration was used when running the model. Even so, as seen from the figure, the match between model and observations is quite satisfactory with a  $r^2$  value of 0.997 between the average dye penetration and the average of 369 DLA model realizations. This confirms the applicability of the model concept and that the DLA can be used to simulate both average and variation in the soil at the field site with limited observations.

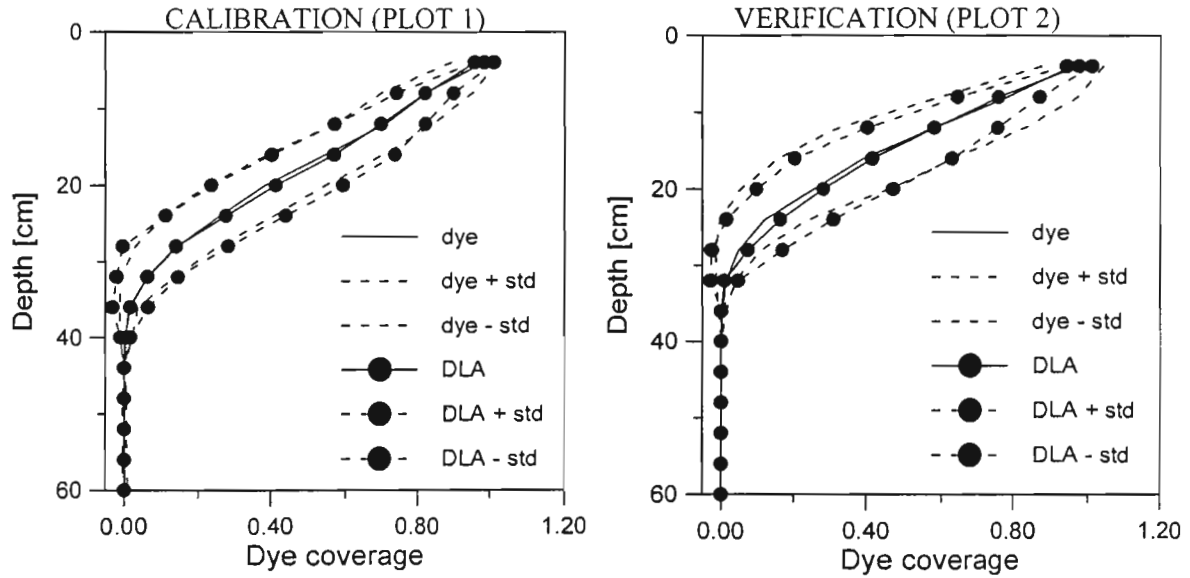


Fig. 3 : Average and standard deviation of dye coverage for the calibrated (plot 1) and verified (plot 2) DLA model.

### Random cascade process

A universal multifractal model according to (4) was tested by comparing estimated parameters with the 95% confidence interval of the empirical  $K(q)$ -functions (Fig. 4). As seen from the figure three out of four plots' universal function is contained within the 95% confidence limits thus confirming the model.

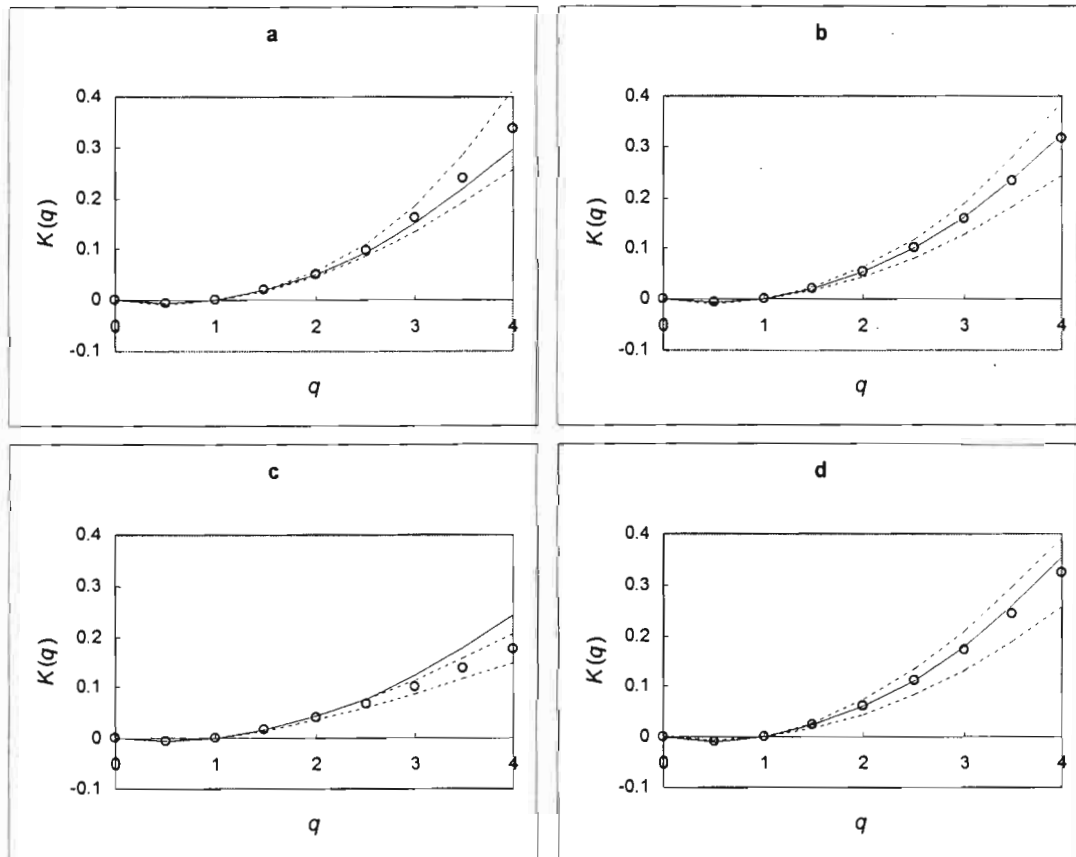


Fig. 4 : Empirical  $K(q)$ -function (point values) with 95% confidence intervals (dashed lines) and fitted universal multifractal  $K(q)$ -function (solid line) for four typical experimental plots.

The encouraging results were used to simulate the dye coverage by use of a random cascade process. In Fig. 5 this is shown by comparing original and simulated maximum infiltration depth for a typical plot (plot 3).

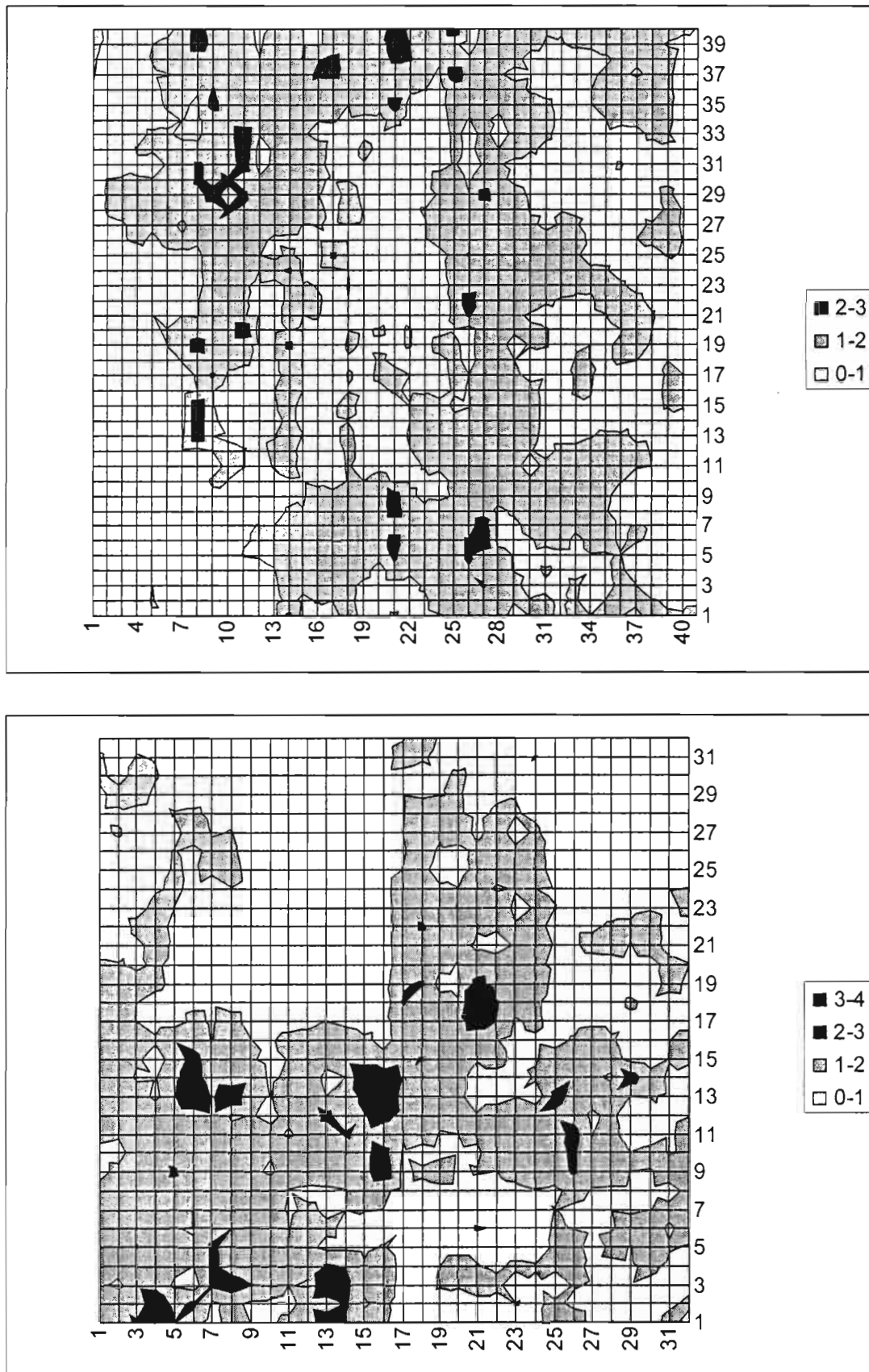


Fig. 5: Observed (upper) and modeled (lower) spatial variation of maximum infiltration depth for experimental plot 3. Simulation was done by discrete cascade simulation of a  $32 \times 32$  field.

As seen from the figure overall variation is well simulated. Areas of similar infiltration characteristics are generally spatially connected. Some over-estimation appears, however, in the simulated case. Even so it is seen that overall properties seem to be well preserved.

## CONCLUSIONS

The conclusions of this study can be summarized as:

- 1) Solute transport properties as indicated from dye coverage experiments displayed fractal properties as viewed by power spectrum analyses and probability distribution characteristics.
- 2) Two fractal models were tested and encouraging results were obtained. The tested fractal models were the diffusion limited aggregation and the random cascade model.
- 3) The diffusion limited aggregation model was calibrated and verified for two plots. The verified model agreed very well to observed data. The random cascade model was calibrated for one experimental plot. Some over-estimation appeared to be the case. However, the general spatial pattern appeared to agree well with observed data. It remains to perform a rigid statistical test for the performance of the random cascade model.

This study showed that fractal models are viable to apply for subsurface flow phenomena. Several previous studies have shown that many soil properties can be viewed as fractal pathways (e.g., Katz and Thompson, 1985; Tyler and Wheatcraft, 1990; Young and Crawford, 1991; Kemblowski and Wen, 1993; Baveye et al., 1998). In this paper we confirmed these results by applying two fractal models to observed dye penetration in unsaturated field soil. Further studies are needed to explore the effects of varying fractal parameters on the investigated models. Also, studies are needed to relate different types of soils to different fractal properties such as fractal and multifractal parameters. We hope to be part of these future studies.

**Acknowledgments.** This study was funded by the European Union through the HYDROMED (Research program on hill reservoirs in the semiarid Mediterranean periphery), the European S&T Fellowship Programme in Japan, the Swedish Research Council for Engineering Sciences, the Swedish Natural Science Research Council, and the Swedish Agency for Research Cooperation with Developing Countries. This support is gratefully acknowledged. We also thank D. Lavallée for providing the discrete cascade simulation algorithm.

## REFERENCES

- AEBY, P., FORRER, J., STEINMEIER, C., and FLÜHLER, H., 1997. Image analysis for determination of dye tracer concentrations in sand columns, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, 33-35.
- BAVEYE, P., BOAST, C.W., OGAWA, S., PARLANGE, J.-Y. and STEENHUIS, T., 1998. Influence of image resolution and thresholding on the apparent mass fractal characteristics of preferential flow patterns in field soils, *Water Resour. Res.*, 34, 2783-2796.
- BERNARD, A., 1987. Le simulateur de pluie 2ème génération, Technical report, ORSTOM, Tunis, Tunisia.
- BEVEN, K. and GERMANN, P., 1982. Macropores and water flow in soils, *Water Resour. Res.*, 18, 1311-1325.
- BOOLTINK, H.W.G. and BOUMA, J., 1991. Physical and morphological characterization of bypass flow in a well-structured clay soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55, 1249-1254.
- BOUMA, J., 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality, *Adv. Agron.*, 46, 1-37.
- DAVIS, A., MARSHAK, A., WISCOMBE, W., and CAHALAN, R., 1994. Multifractal characterizations of nonstationarity and intermittency in geophysical fields: Observed, retrieved, or simulated, *J. Geophys. Res.*, 99, 8055-8072.
- FEDER, J., 1988. *Fractals*, Plenum Press, New York.
- FLURY, M. and FLÜHLER, H., 1995. Modeling solute transport leaching in soils by diffusion-limited-aggregation. Basic concept and application to conservative solutes, *Water Resour. Res.*, 31, 2443-2452.
- FLURY, M., FLÜHLER, H., JURY, W.A. and LEUENBERGER, J., 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study, *Water Resour. Res.*, 30, 1945-1954.
- FRISCH, U., and PARISI, G., 1985. On the singularity structure of fully developed turbulence, in *Turbulence and Predictability in Geophysical Fluid Dynamics and Climate Dynamics – Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi"*, edited by M. Ghil, R. Benzi, and G. Parisi, pp. 84-88, North-Holland, Amsterdam.
- HILLEL, D., 1991. Research in soil physics: A re-view, *Soil Sci.* 151, 30-34.
- KEMBLOWSKI, M.W. and WEN, J.-C., 1993. Contaminant spreading in stratified soils with fractal permeability distribution, *Water Resour. Res.*, 29, 419-425.



- LAVALLEE, D., 1991. Multifractal Analysis and Simulation Technique and Turbulent Fields, Ph.D. Thesis, McGill Univ., Montreal, Canada.
- MANDELBROT, B. B., 1974. Intermittent turbulence in self-similar cascades: Divergence of high moments and dimension of the carrier, *J. Fluid. Mech.*, 62, 331-358.
- MEakin, P., 1991. Fractal aggregates in geophysics, *Rev. Geophys.*, 29, 317-354.
- MENABDE, M., SEED, A., HARRIS, D., and AUSTIN, G., 1997. Self-similar random fields and rainfall simulation, *J. Geophys. Res.*, 102, 13509-13515.
- MENABDE, M., SEED, A., HARRIS, D., and AUSTIN, G., 1999. Multiaffine random field model of rainfall, *Water Resour. Res.*, 35, 509-514.
- MUKHOPADHYAY, S., and CUSHMAN, J. H., 1998. Diffusive transport of volatile pollutants in nonaqueous-phase liquid contaminated soil: A fractal model, *Transport in Porous Media*, 30, 125-154.
- OLSSON, J., PERSSON, M., ALBERGEL, J., ZANTE, P., Nasri, S., and BERNDTSSON, R., 2000. Spatial variability of soil water infiltration: scaling properties and random cascade modeling, manuscript.
- PACHEPSKY, Y., and TIMLIN, D., 1998. Water transport in soils as in fractal media, *J. Hydrol.*, 204, 98-107.
- PERSSON, M., YASUDA, H., ALBERGEL, J., ZANTE, P., BERNDTSSON, R., NASRI, S., and ÖHRSTRÖM, P. 2000. Modeling plot scale dye penetration by a diffusion limited aggregation (DLA) model, manuscript.
- SCHERTZER, D., and LOVEJOY, S., 1987. Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes, *J. Geophys. Res.*, 92, 9693-9714.
- SCHWARTZ, R.C., MCINNES, K. J., JUO, A.S.R. and CERVANTES, C.E., 1999. The vertical distribution of a dye tracer in a layered soil, *Soil Sci.*, 164, 561-573.
- Soil Survey Staff, 1996. Keys to soil taxonomy, United States Department of Agriculture, Washington, D.C.
- TESSIER, Y., LOVEJOY, S., and SCHERTZER, D., 1993. Universal multifractals: Theory and observations for rain and clouds, *J. Appl. Meteorol.*, 32, 223-250.
- WHEATCRAFT, S. W. and TYLER, S. W., 1988. An explanation of scale dependent dispersivity in heterogeneous aquifers using concepts of fractal geometry, *Water Resour. Res.*, 24, 566-578.
- WITTEN, T. A. and SANDER, L.M., 1981. Diffusion-limited aggregation: A kinetic critical phenomenon, *Phys. Rev. Lett.*, 47, 1400-1403.
- ÖHRSTRÖM, P., PERSSON, M., ALBERGEL, J., ZANTE, P., NASRI, S., BERNDTSSON, R., and NASRI, S., 2000. Field scale variation of preferential flow indicated from dye coverage, manuscript.

# STRATEGIES TRADITIONNELLES DE CONSERVATION DE L'EAU ET DES SOLS EN ZONE MEDITERRANEENNE.

Roose E.\* et Sabir M.\*\*

*\*Réseau Erosion de IRD-ORSTOM, BP. 5045, 34032 Montpellier, France*

*Courriel : Eric.Roose@mpl.ird.fr*

*\*\*ENFI, BP.511 Salé, Maroc*

## RESUME.

Les versants méditerranéens ont la réputation d'être très sensibles aux phénomènes d'érosion pour des raisons écologiques (pluies erratiques, relief jeune), historiques (succession de civilisations) et démographiques (forte pression foncière). Les mesures des différents processus depuis la parcelle jusqu'aux bassins versants ont montré que l'érosion en nappe est faible, mais que le ruissellement augmente avec le pâturage et l'extension puis l'abandon des cultures, entraînant le ravinement, la dégradation des berges des oueds lors des fortes crues, des inondations et l'envasement rapide des barrages. Pour survivre face à l'aridification du milieu, les paysans ont développé de nombreuses techniques pour tirer parti de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Les auteurs ont profité de la variété écologique des zones méditerranéennes pour étudier la diversité des stratégies de gestion de l'eau dans le Maghreb, Israël et les zones méridionales de l'Europe. Ils les ont classées en fonction de leur objectifs, de leur fonctionnement et des situations écologiques où elles ont été observées : systèmes de collecte du ruissellement, d'infiltration totale, de diversion ou de dissipation de l'énergie du ruissellement. L'étude de ces techniques peut aider à préciser le milieu écologique et à instaurer un dialogue amenant les communautés paysannes à entretenir leur environnement.

## MOTS-CLES

Zone méditerranéenne, Stratégies traditionnelles, Conservation de l'eau, Typologie écologique.

## INTRODUCTION

La zone méditerranéenne a la réputation d'être sujet à des risques érosifs très élevés (Hudson, 1987). D'abord pour des raisons écologiques : les pluies sont erratiques, les sols sont mal couverts durant la saison des pluies, le relief est très jeune car des roches dures protègent des roches argileuses tendres, la terre tremble souvent, les versants sont raides avec des vallées étroites ou de longs glacis avec des vallées larges mais sujettes à la salinisation. Durant l'été torride, l'érosion éolienne est courante et les orages très violents. Par contre à la fin de l'hiver froid, les pluies tombant sur des sols saturés et encroûtés provoquent de forts ruissellements, des rigoles évoluant rapidement en ravines. Les crues qui dévastent les berges des oueds, entraînent des inondations, des glissements de terrain, l'envasement rapide des barrages (en 30 à 50 ans), la destruction des routes et autres ouvrages d'art. Tant que la végétation couvre les versants, les phénomènes de ruissellement et d'érosion restent modérés, mais on peut observer des désastres là où de longues averses tombent sur des sols nus saturés ou lors des orages violents d'automne (Demmak, 1982).

Par ailleurs de nombreuses civilisations se sont succédées autour de la Méditerranée de sorte que depuis trois mille ans, les forêts ont été défrichées pour produire du bois de chauffe et du bois d'oeuvre pour les constructions, les marines marchandes et militaires. Les peuples ont construit de grandes cités (milieu imperméable) et développé l'agriculture irriguée dans les plaines (salinisation) et l'élevage extensif en montagne (pour échapper aux envahisseurs). Il s'en est suivi la dégradation des couvertures végétales et des sols, l'encroûtement ou le décapage des horizons humifères, le creusement des rigoles en ravines, particulièrement le long des pistes et des drailles empruntées régulièrement par le bétail pour rejoindre les points d'eau et les pâtures (tassement).

C'est pourquoi, les paysans méditerranéens ont développé des stratégies pour minimiser les risques d'érosion, la dégradation des ressources en eau, en biomasse et la fertilité des sols (Lowdermilk, 1975, Roose, 1994). Vu la grande diversité écologique, le bassin méditerranéen est une zone intéressante pour observer ces processus d'érosion et les méthodes de gestion de l'eau et de la fertilité des sols avant la modernisation de l'Agriculture au 20<sup>ème</sup> siècle. Dans cette note, les auteurs présentent une synthèse des

stratégies traditionnelles observées dans le Maghreb (Maroc, Algérie, Tunisie), la Lybie, Israël et le sud de l'Europe (France, Espagne et Crète). Ceci ne veut pas dire qu'il n'y en a pas ailleurs, mais que la plupart des méthodes se retrouvent sous des climats voisins de chaque côté de la mer. Après avoir décrit la diversité des problèmes posés par l'eau en montagne semi-aride, les auteurs ont classé les systèmes antiérosifs traditionnels en tenant compte des risques de ruissellement à l'échelle des champs.

## **LES CARACTERES SPECIFIQUES DU MILIEU MEDITERRANEEN**

### **Des pentes raides et des paysages ravinés**

Sur photos aériennes, les zones méditerranéennes sont caractérisées par leurs versants raides profondément ravinés, des colluvions caillouteuses, des oueds torrentiels et des réservoirs rapidement envasés : ces signes sont des indicateurs de la puissance du ruissellement même dans les zones semi-arides. Et pourtant, les mesures de terrain ont souvent montré que ces paysages, colonisés depuis des millénaires, sont moins fragiles qu'il paraît à première vue. Certes les montagnes sont jeunes, les pentes souvent raides ou longues, les vallées étroites et les rivières torrentielles, mais tant que ces montagnes sont couvertes de forêts ou de mattoral (pas trop dégradés), le ruissellement annuel ne dépasse pas 20% et les pertes en terre 1 mm/an d'après Heusch (1970) sur les marnes du Pré-Rif et Laouina (1998) au Maroc, Delhumeau (1981) et Delhoume (1987) sur les calcaires tunisiens et Roose et al., (1993) sur différents sols d'Algérie.

De nombreuses ravines héritées du passé ne sont plus fonctionnelles que durant les averses exceptionnelles. Comme les sols sont généralement mal couverts, les averses exceptionnelles ont un impact beaucoup plus fort qu'en zones tropicales sur le ruissellement et les manifestations spectaculaires de l'érosion (ravines, glissements de terrain et inondations) (Roose, 1972). Contrairement à l'opinion générale, l'inclinaison de la pente n'augmente pas forcément le ruissellement ni même l'érosion : des roches peuvent protéger le sommet des collines, tandis que les colluvions profondes au bas des versants concaves peuvent collecter beaucoup de ruissellement lequel creuse des rigoles et des ravines profondes. La position topographique sur un versant peut être plus important que la pente (Heusch, 1970, Roose, 1972, Roose et al., 1993). Les colonisations successives, les pressions démographiques et économiques de ces 50 dernières années (déforestation, surpâturage, extension rapide des céréales et localement du cannabis pour la survie des paysans pauvres) ont rompu l'équilibre de ces paysages instables.

### **Des couvertures végétales dégradées, des forêts surexploitées et surpâturées.**

La végétation des zones semi-arides, généralement surpâturée, les céréales extensives, les vignobles et les vergers protègent mal le sol des pluies tombant en saison froide. (Roose et al, 1993). Les plantations de pins et d'eucalyptus sont sensibles au feu et leur exploitation intensive laisse le sol épuisé et nu. Les feux de brousse accélèrent le ruissellement et l'érosion durant quelques mois, mais si les adventices envahissent le sol au retour des pluies, l'érosion décroît rapidement (Martin, 1997). Dans le Maghreb on assiste actuellement au recul de la forêt (<5% au Maroc) par surpâturage, feux et finalement cultures extensives de céréales (ou cannabis) en vue de s'appropriier les terrains communaux (Roose et al., 1999).

Il s'en suit des glissements de terrain sur pentes fortes, des rigoles et ravines à mi-pente, inondations dans les vallées ou destruction des meilleurs sols sur les terrasses récentes et finalement aridification de tout le paysage. Les pratiques culturales masquent les rigoles et autres indicateurs de ruissellement, mais l'épaisseur des sols diminue, la roche affleure et la production décroît. (Roose et al., 1993). Par manque d'eau et parce que les sols sont pauvres en azote et phosphore, les rendements des cultures sont très faibles (4 à 10 quintaux/ha) et la couverture végétale inopérante. Le cercle de la pauvreté est bien connu : parce que les sols sont pauvres, les petits paysans étendent les cultures et accélèrent encore la dégradation de leurs terres.

### **Importance des pluies exceptionnelles dans les paysages méditerranéens.**

Les zones méditerranéennes reçoivent la majorité des pluies durant les périodes froides de l'hiver et du printemps, pendant lesquelles les arbres n'ont pas de feuille et les cultures couvrent mal le sol. De plus les orages sont dangereux dans ces régions. Par exemple, il a plu 350 à 600 mm entre le 12 et le 14 novembre 1999 dans les vignobles du département de l'Aude (SO de la France) : des coulées boueuses et des inondations brutales détruisirent en deux jours l'économie régionale et tuèrent 35 personnes.

Mais d'après Demmak (1982), ces orages qui font tant de dégâts localement, n'apportent pas tant de sédiments dans les barrages que les longues averses tombant pendant plusieurs jours en hiver/printemps sur des sols saturés, dénudés, compactés par le pâturage ou finement préparés avant les semis. Ces pluies abondantes provoquent des débits de pointe importants qui emportent les sédiments accumulés dans les ravines et les oueds pendant des mois (ou années) de période sèches. (Olivry & Horelbeck, 1989).

Contrairement à l'opinion générale, les pluies ordinaires ont cinq fois moins d'énergie dans les montagnes méditerranéennes que les pluies tropicales (Roose et al., 1993). Il est donc important de noter que la source d'énergie dont dépend l'érosion est plus liée au ruissellement concentré dans les ravines et les oueds que dans la battance des pluies. (Heusch, 1970).

Par conséquent la lutte antiérosive en région méditerranéenne doit s'organiser autour de la gestion des eaux sur les versants.

### **Lithologie : succession de roches dures et tendres.**

D'après Demmak (1982), il y a une relation étroite entre le type d'érosion, les transports de sédiments et la lithologie. Là où les roches sont résistantes, on trouve les pentes les plus fortes et des couverts végétaux denses et des transports de sédiments faibles ; mais sur les roches argileuses tendres et les marnes on peut trouver des pentes relativement modérées, des activités humaines intenses, une végétation peu dense et des transports abondants de sédiments (Heusch, 1970).

### **Les sols sont résistants à la battance des pluies mais peu à l'énergie du ruissellement.**

Les lithosols, les sols rouges fersiallitiques, les sols bruns calcaires, les rendzines noires et les vertisols gris qui couvrent la majorité des versants sont généralement bien structurés, bien aggrégés, riches en argiles (surtout de type 2/1), en calcaire, en fer libre ou en cailloux. Ils sont assez perméables s'ils ne sont pas tassés par le bétail et résistants à la battance des pluies, mais pas forcément au ravinement et glissement de terrain. La présence de gypse et de sel dans les marnes augmente beaucoup leur fragilité (tunnelling, glissements en masse et ravinements). La résistance des sols à la battance est limitée dans le temps ( $K_{sle} = 0,001$  à  $0,30$ ) : avec le surpâturage, le défrichement, les cultures sans recyclage des matières organiques (MO), la charge solide des eaux de ruissellement en nappe reste modérée ( $MES = 1$  à  $3$  g/l), mais dès qu'apparaissent les rigoles, la charge augmente jusqu'à  $5$  à  $20$  g/l sur rigoles et plus de  $20$  à  $200$  g/l dans les ravins et les oueds.

### **Deux conséquences pour la conservation des sols.**

\* Durant de nombreuses années le paysage peut sembler stable, mais une averse de fréquence rare (1/10) peut changer profondément l'allure des versants. En zone méditerranéenne, les stratégies de conservation de l'eau et des sols doivent retarder le début du ruissellement, mais aussi prévoir la dissipation de l'énergie du ruissellement sur des surfaces stables (herbeuses, litière, mulch de cailloux), plutôt que de concentrer le ruissellement dans des canaux qui vont tôt ou tard se transformer en ravines lors des orages exceptionnels.

\* Sur les versants cultivés des régions tempérées et tropicales, l'énergie de la battance des pluies est indispensable pour préparer la terre à l'érosion en nappe. Sur les versants raides de la région méditerranéenne, l'énergie du ruissellement est suffisante pour arracher et transporter des mottes entières et des cailloux. L'érosion y est rarement sélective : la terre est directement décapée par les rigoles, ravines et glissements en planche.

## **LES PRINCIPAUX PROBLEMES DE DEGRADATION DES SOLS SUR LES VERSANTS**

Vu la diversité des situations écologiques et humaines, les paysans doivent faire face à des problèmes très divers pour tirer le meilleur parti des ressources naturelles.

### **L'érosion en nappe et la dégradation de la fertilité des sols.**

La forêt et le mattoral apportent au sol  $3$  à  $10$  t/ha/an de litière et de racines qui vont être minéralisées rapidement, comme dans tous les pays chauds. Mais dès que cette forêt est pâturée, brûlée ou défrichée, l'équilibre est rompu et le taux de MO du sol diminue jusqu'à atteindre un nouvel équilibre fonction du système de production. Sous des seuils de  $1.5$  à  $0.8\%$  de MO (en fonction du taux d'argile), l'activité de la

mésosfaune et la macroporosité s'effondrent, la capacité d'infiltration diminue, de même que l'aggrégation et la résistance à l'érosion. Il est donc essentiel de gérer astucieusement la biomasse et la fertilité des sols pour conserver sa productivité (Roose & Barthès, 2000).

L'érosion en nappe est partout active là où les sols sont dénudés, même si les paysans n'en sont pas conscients. Dans les parcelles d'érosion du Maghreb et même de Provence, l'érosion en nappe est modérée ( $E < 1 \text{ mm/an}$ ), mais elle participe à la dégradation de la fertilité des sols. Une analyse rapide des données à l'aide du modèle USLE (Wischmeier & Smith, 1960) montre que l'amélioration de la couverture végétale ou des cailloux du sol ( $C$  varie de 1 à 0,001) ou de la pente ( $SL$  varie de 0,1 à 20) est bien plus efficace que le choix du sol

( $K = 0,01$  à  $0,30$ ) et des techniques antiérosives ( $P = 1$  à  $0,1$ ). La lutte antiérosive (LAE) va donc tenter de modifier le système de culture et la topographie. La rugosité du sol perd de son efficacité sur les pentes supérieures à 25%.

### **L'érosion linéaire**

Pour les paysans l'érosion commence avec les rigoles et les ravines et la majorité des systèmes traditionnels de LAE s'appliquent à réduire le ruissellement concentré et l'érosion linéaire. Si on n'intervient pas sur les champs après les orages pour effacer les traces du ruissellement concentré, les rigoles vont nécessairement évoluer en ravines et ruiner la terre ; c'est le signe de l'abondance du ruissellement dont l'énergie a surpassé celle des pluies. En montagne méditerranéenne il va donc falloir développer un système de gestion des eaux de surface bien adapté aux pentes fortes, rocailleuses, peu couvertes.

Les principaux facteurs qui régissent le ravinement sont le volume ruisselé (fonction de la surface du bassin, la saturation du sol, la capacité d'infiltration et de stockage de l'eau), la vitesse du ruissellement (fonction de la pente, de la rugosité de la surface) et de la résistance du matériau au cisaillement développé par le ruissellement.

### **Les mouvements en masse.**

Glissements rotationnels ou en planche, solifluxion, laves torrentielles sont fréquents lors des averses abondantes. Les paysans en ont peur et n'ont aucune parade, sauf de situer leur habitat sur des segments convexes des versants ou de planter des eucalyptus qui dessèchent le sol. Le creeping est accéléré par le travail du sol (1 à 4 mm/an en fonction de la fréquence et de l'intensité du travail). Les talus en bas des parcelles croissent de 10 à 20 cm/an, essentiellement par l'érosion due au travail du sol.

En conclusion, les stratégies traditionnelles de LAE s'intéressent particulièrement à la gestion du ruissellement sur les versants pour améliorer la productivité du sol. Il s'agit de capter le ruissellement dans des citernes ou les sols cultivés, d'améliorer l'infiltration des pluies, d'évacuer rapidement les excès d'eau vers des exutoires ou de dissiper l'énergie du ruissellement au travers des bandes enherbées, des haies ou des cordons de pierres.

## **LA GESTION DES EAUX POUR PROTEGER LES SOLS**

Les différents systèmes observés seront classés selon quatre modes de gestion de l'eau et en raison de leur fonctionnement.

### **La capture du ruissellement sous impluvium en région semi-aride.**

#### **Stockage de l'eau dans le sol.**

\* **Agriculture sous impluvium.** Le ruissellement provenant du sommet des collines (souvent surpâturées) est absorbé dans les colluvions cultivées en céréales au pied des collines : ex Gabès en Tunisie (Bourges et al., 1984). Avec le tracteur, les paysans travaillent rapidement le pied des collines marneuses, en espérant collecter assez d'eau tous les 2 ou 3 ans pour produire un peu plus de 5 quintaux/ha de grain et autant de paille.

\* **Les meskat** couvrent 200 000 ha dans la région de Sousse en Tunisie. Avec 200 mm de pluie, les oliviers ont besoin de doubler leur surface pour produire leurs fruits. Les sommets des collines sont maintenus dénudés (surpâturés) pour produire du ruissellement qui est redistribué dans la zone cultivée (Manka), grâce à un gros billon (tabia), capable de stocker le ruissellement de fréquence cinquantenaire. (El

Amami, 1983). Actuellement la pression foncière est si forte que l'impluvium est progressivement envahi par les oliviers.

\* **Les demi lunes de terre et de pierres** délimitent des cuvettes de 4 à 10 m<sup>2</sup> : construites à la base d'une colline rocheuse elles sont plantées d'oliviers qui prospèrent sous des pluies de 300 mm/an dans la plaine de Kairouan (Tunisie).

\* **Dans le désert du Néguev en Israël, des canaux** récoltent le ruissellement le long des collines pour irriguer des arbres plantés dans des cuvettes, ou des champs de céréales. Sabir et al., (1999) ont observé récemment dans le Rif occidental au Maroc, des **chemins pavés** recueillant le ruissellement issu des sommets des collines surpâturées et le redistribuant dans les terrasses en gradins cultivées en aval.

\* **Empilements.** Dans les zones caillouteuses du Rif, les auteurs ont observé les paysans déplaçant les grosses pierres (>20 cm) et les empilant sur des gros blocs inamovibles pour faciliter le labour et augmenter la surface cultivable. Ces empilements vont croître avec le temps pour former des **cordons de pierres** d'abord discontinus et enfin des cordons continus qui dissipent l'énergie du ruissellement. Si la forme et la fréquence des pierres le permettent, des **murettes de pierres** sont construites en priorité pour isoler les champs cultivés du bétail.

\* **Les terrasses en gradins** souvent irriguées sont nées en Chine il y a 3000 ans et se sont répandues dans le bassin méditerranéen avec le commerce de la soie et des esclaves il y a environ 1500 ans. Elles ont été améliorées en Crète par la protection du talu par un mur de pierres. On les retrouve en Espagne, dans le midi de la France comme dans le Rif et l'Atlas au Maroc (Laouina, 1998). Leur construction est progressive car elle demande 800 à 1500 jours de travail par hectare. Comme leur entretien exige aussi beaucoup de main d'oeuvre, elles sont souvent abandonnées si leur production n'est plus assez rentable. Près de Valencia, en Espagne, en situation favorable (vignobles et citrus), les murettes sont cimentées pour réduire au minimum la maintenance.

### Les systèmes stockant le ruissellement dans des citernes.

\* **Les " Magden " en Algérie, " matfia " dans le Rif ou " lavogne " en France** sont des mares creusées à ciel ouvert de quelques dizaines de m<sup>3</sup> qui stockent le ruissellement d'une piste ou d'un court impluvium (caillouteux ou encroûté et tassé), pour assurer l'abreuvement du bétail. Avec une mare de 80 m<sup>3</sup>, il fut possible dans la région de l'oued Mina en Algérie d'entretenir 40 moutons et une famille et d'irriguer un petit jardin fruitier dans des collines marneuses recevant 300 mm de pluie par an. Le plus gros problème est de réduire l'apport de sédiments et de maintenir la qualité des eaux en tenant le bétail hors de la mare.

\* **Les citernes cimentées.** Les romains et les arabes ont construit bon nombre de citernes enfouies dans le sol, captant les eaux du toit (Mazets de Montpellier) ou d'un impluvium rocheux (citerne Telman étudiée par Bourges et al, 1979 près de Gabès en Tunisie). Van Wesemael et al. (1998) ont étudié 51 citernes enfouies (aljibes) dans la province de Almería (Espagne). Ce système est encore viable de nos jours pourvu que la citerne et le volume ruisselé soit suffisant pour remplir la citerne (>60 m<sup>3</sup>).

### Le stockage du ruissellement dans la vallée.

\* **Construction de terrasses étroites dans l'oued.** Dans les zones semi-arides où il est difficile de cultiver les versants, des haies vives sont implantées en bordure de l'oued pour ralentir la vitesse du courant, capter les eaux et leur charge en sédiments pour construire progressivement un jardin de saison sèche ou alimenter une " séguia " (canal courant le long de la colline pour irriguer une terrasse en aval). Ces haies sont constituées de cannes de Provence, divers peupliers, saules, frênes, tamaris, eucalyptus et lauriers roses, carex et joncs.

\* **Les jessours.** Dans les zones arides du sud de la Tunisie, des digues en terre sont construites en série dans les vallées pour capter le ruissellement et sa charge solide en vue de construire une suite de terrasses plantées progressivement en arbres fruitiers (palmiers, figuiers et oliviers), en céréales et légumineuses (Bonvallot, 1986).

\* **Limans.** Il s'agit d'une digue barrant une tête de vallée dans le Néguev pour intercepter les rares crues. La culture est organisée en amont dès que l'infiltration du ruissellement est complète. (Eveneri et al, 1968).

\* **Des barrages collinaires** sont construits en Tunisie Centrale pour récolter le ruissellement qui sera redistribué pour l'irrigation de petites terrasses en aval, ou pompée sur les bords. (Albergel et al. 1998).

### Systèmes favorisant l'infiltration totale

Là où les pluies sont inférieures à 400 mm/an, les paysans ont développé les fameuses **terrasses méditerranéennes** sur des pentes atteignant 40% : au-delà, les risques de glissement de terrain augmentent

rapidement surtout sur argilite, marnes, schistes et gneiss. En fonction du matériau disponible localement, les talus sont en terre (comme dans les loess chinois), ou renforcés par des herbes (s'il n'y a pas de pierre) ou par des pierres aux endroits sensibles. Mais généralement, on s'oriente vers des techniques comme le sous-solage profond, le billonnage cloisonné et le paillage pour améliorer l'infiltration (Hudson, 1987).

### **Les techniques basées sur la diversion des excédents d'eau.**

\* **Les sillons de diversion (dérayures)** peuvent servir à évacuer rapidement les excès d'eau à la surface des champs de céréales. C'est le cas sur les sols argileux tant en Algérie, dans le Rif qu'en Aveyron dans le sud de la France. La pente de ces sillons ne doit pas dépasser 5% sous peine d'être à l'origine d'une ravine. Dans le vignoble de Banyuls (midi de la France) des murettes en pierres retiennent la terre sur les versants raides schisteux. Mais pour éviter les glissements de terrain, il a fallu ouvrir des **fossés obliques** qui drainent les eaux excédentaires vers des collecteurs principaux empierrés : ces **drains en arrêtes de poisson** fonctionnent comme le **billonnage oblique**, pratique culturelle qui permet un lent drainage des eaux vers des exutoires aménagés en bordure des parcelles. Ces systèmes de diversion réduisent les risques de ravinement dans les parcelles cultivées, mais accélèrent le drainage du versant, tendent à raviner les exutoires et à augmenter les débits de pointe dans les vallées (érosion des berges et inondations).

\* Des **fossés de diversion** (R'foussi en berbère) peuvent aussi capter les eaux des impluviums (route ou glaci) pour les étaler sur les champs de culture où les orienter vers les cuvettes des oliviers (plaine de Midar dans le Rif oriental)(Communication orale de Abbassi, 2000).

### **Les techniques de dissipation de l'énergie du ruissellement.**

\* **Les terrasses progressives en amont de microbarrages perméables.** Au lieu de concentrer les eaux de ruissellement en nappe dans des fossés de diversion (avec les risques que l'on sait en montagne) ce système tente de ralentir le ruissellement et de dissiper son énergie en dispersant les eaux sur la rugosité de la surface du sol (mottes, cailloux, paillage, litière de résidus de culture, adventices) et sur des structures perméables (bandes enherbées, haies, talus enherbés, cordons de pierres)(Roose, 1994). En montagne méditerranéenne ce système de gestion de l'eau est très fréquent avec des talus couverts d'herbes diverses(diss, sulla, etc.), de buissons (oléastres, amandiers, palmiers doum, acacia horrida) ou de cactus (opuntia, agaves).

Sur les lithosols, les pierres sont accumulées en tas, en cordons ou en murettes de pierres, selon la qualité et la fréquence des pierres. Les talus s'élèvent progressivement grâce aux labours, à la sédimentation des terres érodées entre les talus et aux soins des paysans (5 à 20 cm/an). La pente diminue jusqu'à atteindre une forme concave en équilibre, mais le ruissellement continue de descendre la colline, en écoulements diffus, avec une vitesse et une énergie réduites. Lors des pluies importantes, les versants aménagés en talus ne ravinent pas comme leurs voisins non aménagés (Abbassi : communication orale, 2000).

\* **Les terrasses en gradins avec des murettes en pierres.** En Espagne, on peut admirer des terrasses en gradins construites depuis le 4ème siècle sous la pression des Romains, puis des arabes (ex : Benicadell, Valencia). Sur les "bancals" construites sur les pentes modérées et les meilleurs sols des piedmonts poussent des cultures mixtes (oliviers et céréales). Sur les sommets concaves des versants, les "terrazas" sur lithosols superficiels ne supportent que des amandiers rustiques : elles sont abandonnées aux forêts de pins en cas de manque de main d'oeuvre (Rubio & Asins, 2000). Des financements européens permettent actuellement leur réhabilitation pour favoriser le tourisme. Certaines pratiques culturelles augmentent l'efficacité de ces terrasses comme le labour grossier profond, le paillage ou le semis direct dans la litière des résidus de culture.

## **DISCUSSION**

### **L'efficacité des systèmes traditionnels.**

De nombreux systèmes traditionnels de conservation de l'eau et des sols ont été décrits et classés en fonction du bilan hydrique local, de la topographie, de leur fonctionnement et de leurs objectifs. Il en existe peut-être encore d'autres dans les pays méditerranéens non visités. Leur efficacité est limitée par les conditions climatiques et socio-économiques qui varient dans le temps et dans l'espace. La stabilité des versants est donc dynamique et peut passer par diverses phases en relation avec l'évolution des populations et des



conditions socio-économiques : dégradation du milieu lors du défrichement et des premières cultures, stabilisation par les aménagements, déstabilisation à cause de l'émigration de la main d'oeuvre jeune, mais restabilisation au retour des émigrés, grâce aux investissements des retraités pour s'assurer la propriété du foncier.

### **La pérennité des techniques traditionnelles.**

De nos jours, certains systèmes traditionnels sont en voie de disparition, non pas qu'ils soient incapables de préserver les ressources naturelles, mais parce que les conditions humaines ont changé. Au sud de la Méditerranée, la population a quintuplé depuis le début du siècle et exige des systèmes plus performants et un niveau de vie plus conforme à ce qu'on peut voir à la télévision. Ces systèmes traditionnels exigent souvent beaucoup de travaux d'entretien. Or les jeunes émigrent en ville ou en Europe pour gagner mieux leur vie (et celle des familles restées au pays) : on manque localement de main d'oeuvre ou de financement pour leur entretien. En Europe, la population rurale a diminué et les systèmes qui ne sont pas adaptés à la mécanisation sont abandonnés. Récemment pourtant, l'Union Européenne a financé un programme de réhabilitation des terrasses en Espagne pour restaurer des paysages (tourisme) et aussi pour protéger des villes et des plaines agricoles contre les crues, les inondations et les flots de boue.

### **La gestion de l'eau et de la fertilité des sols en montagne.**

La majorité des techniques de LAE en montagne semi-aride vise d'abord la gestion de l'eau, sa capture, son stockage et sa valorisation. Mais en même temps qu'il "irrigue" les terres, le ruissellement capté apporte des matières en suspension et améliore la fertilité du sol.

Dans les zones semi-arides, la production végétale n'est pas seulement limitée par la disponibilité en eau mais aussi par les carences du sol en nutriments, principalement en phosphore et en azote, continuellement exportés par les récoltes de céréales. Pour restaurer la capacité de production des terres, les paysans pratiquent toute une série de techniques traditionnelles : la rotation ou l'association des céréales et des légumineuses, le fumier (généralement pauvre qualitativement et en faible quantité), divers systèmes de compostage, la jachère pâturée, des systèmes agro-forestiers (rotation céréales/fèves sous oliviers, amandiers ou figuiers) et sylvo-pastoraux (parcours sous divers chênes). Ces systèmes complexes aident à maintenir un niveau minimal de production (4 à 15 quintaux/ha/an), mais un apport complémentaire d'engrais minéraux (N+P) est indispensable pour valoriser les apports d'eau si on veut intensifier la production.

### **L'agriculture de montagne oubliée du développement.**

Ces cinquantes dernières années, les gouvernements du Maghreb ont investi dans l'industrie, l'irrigation et l'intensification de l'agriculture des plaines, pour faire face à la pression démographique : mais personne ne s'est investi dans les montagnes ! Dans les montagnes, les paysans pauvres se sont débrouillés comme ils ont pu pour survivre, étendant les cultures céréalières jusque sur les versants les plus raides, sacrifiant les arbres, le matorral et même les résidus de culture pour assurer la survie de l'élevage (principale ressource financière), pour l'énergie (30% du temps est consacré à la récolte du bois et des réserves fourragères) ou pour la culture du cannabis, la plus rentable dans le Rif. Faute d'investissements productifs et de recherches, bien des versants sont dénudés, les terres abandonnées sont ravinées et la couverture pédologique envase les réservoirs. L'émigration s'accélère dans ces zones. Comme les versants se dégradent lors du défrichement et des premières années de céréaliculture, il va falloir inventer un système d'extension et de valorisation des versants raides par plantation d'arbres fruitiers sur cuvettes respectant un espace couvert de plantes fourragères pérennes pour l'élevage.

## **CONCLUSION.**

### **L'échec partiel des stratégies d'équipement et de restauration des sols.**

Devant l'accélération des méfaits de l'érosion durant le 20ème siècle, les gouvernements centraux ont proposé deux approches :

\* **la conservation de l'eau et des sols (CES)** (Bennet, 1939) : l'Etat finance des projets de protection des sols en vue de maintenir la qualité des eaux des barrages ou de protéger des aménagements ou la



productivité des sols. Or le rythme d'envasement des barrages n'a pas baissé et la dégradation des sols continue entre les banquettes. Actuellement les sols sont si dégradés qu'il est rarement rentable de les restaurer.

**\* la défense et restauration des sols (DRS)** par la plantation des forêts, le terrassement des versants cultivés et la correction torrentielle. Au bout d'un demi siècle, bien des arbres plantés n'ont pu se développer correctement et les sols sous litières de pin ou d'eucalyptus sont épuisés. Il faut d'urgence trouver des terres productives. Après l'analyse de 150 programmes de CES ou DRS, Hudson (1987) a du conclure à l'échec de ces stratégies : les sols continuent à se dégrader, les lacs à s'envaser et les diverses formes d'érosion à s'étendre. Les tentatives de compensation par l'apport des structures de base en montagne n'ont pas résolu le problème.

## La Gestion Conservatoire de l'Eau et de la fertilité des Sols

Au séminaire de Puerto Rico (1987), une nouvelle stratégie a été proposée (la GCES ou Land husbandry), basée sur la participation paysanne pour résoudre leurs problèmes " valoriser durablement la terre et le travail ". Le défi consiste à augmenter la productivité des terres tout en réduisant les risques d'érosion. Il s'agit de donner une chance aux cultures de couvrir rapidement le sol en améliorant l'infiltration et la disponibilité en nutriments. Au niveau de la recherche, cette approche a été testée dans diverses conditions en France, Algérie, Burkina, Cameroun, Cap-Vert, Rwanda, Burundi, Haïti, Equateur, etc. (Roose, 1994).

## L'utilité pour le développement rural des études sur les techniques traditionnelles

L'étude des performances des stratégies traditionnelles s'avère particulièrement utile pour définir avec les paysans un nouveau point de départ pour tenter de résoudre au niveau local les problèmes d'érosion qui ne peuvent trouver de solution purement technique. Les paysans connaissent mieux que quiconque les difficultés du milieu qu'ils exploitent. L'approche participative dès le stade du diagnostic améliore les connaissances du milieu écologique et humain. Les chercheurs, en relation étroites avec les techniciens de l'Etat et les paysans doivent étudier les potentialités, les limites et les améliorations possibles des techniques traditionnelles connues des paysans. Du dialogue entre paysans et scientifiques peut naître une prise en charge de l'environnement rural par la communauté qui exploite ses ressources naturelles moyennant une aide technique et financière de l'Etat: en effet l'entretien du " château " d'eau que constitue la montagne profite aux occupants des vallées et des villes en aval. Il ne reste pas moins des problèmes graves (glissements de terrain, inondations, ravinement torrentiel, érosion par les oueds) qui restent du ressort d'équipes techniques spécialisées plus compétantes au service de l'Etat.

## REFERENCES

- ALBERGEL J., BOUFAROUA M., PEPIN Y. (1998) Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires en Tunisie semi-aride. *Bull. Réseau Erosion*, IRD-ORSTOM, Montpellier, **18** : 67-75.
- ARABI M. & ROOSE E. (1989) Influence de quatre systèmes de production sur l'érosion en zone méditerranéenne de moyenne montagne algérienne. *Bull. Réseau Erosion* **9** : 39-51.
- BONVALLOT J. (1986) Tabias et jessour du Sud tunisien. *Cah. Orstom Pédol.* **22**, **2** : 163-172.
- BOURGES J., FLORET C., GIRARD G., PONTANIER R. (1979) Etude d'un milieu représentatif du Sud tunisien type suivi : la citerne Telman (1972-1977). Rapport ORSTOM-DRES, Tunis, 147 p.
- DELHOUME J.P. (1987) Ruissellement et érosion en bioclimat méditerranéen semi-aride de Tunisie Centrale. In " *Processus et mesures de l'érosion* " Edn. CNRS, Paris : 487-507.
- DELHUMEAU M. (1981) Etude de la dynamique de l'eau sur parcelles du bassin de l'Oued Sidi Ben Naceur, Nord Tunisie. Rapport ORSTOM Tunis, 80 p.
- DEMMAK A. (1982) Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse Doct. Ing. Paris, 323 p.
- EL AMAMI S. (1977) Traditional technologies and development of the african environments. Utilisation of runoff water : the meskat and other techniques in Tunisia. *African Environment*, **3** : 107-120.
- EVENARY M., SHANAN L., TADMOR N. (1968) Runoff farming in the Neguev desert. *Agron. J.*, **60**, **2** : 29-38.
- HEUSCH B. (1970) L'érosion du Pré Rif. Etude quantitative dans les collines marneuses. *Annales Recherches Forestières du Maroc* **12** : 9-176.
- HUDSON N.W. (1987) Soil and water conservation in semi-arid areas. *FAO Soils Bull.* **57**, 172 p.
- HUDSON N.W. (1991) A study of the reasons for success or failure of soil conservation projects. *FAO Soils Bull.*, Rome, **64** : 65 p

- LAOUIA A. (1998) Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. *Bull. Réseau Erosion*, **18** : 33-53.
- LOWDERMILK W.C. (1975) Conquest of the land through 7000 years. *Agric. Information Bull.* **99**, USDA-SCS, Washington DC, USA
- MARTIN C. (1997) L'érosion hydrique après incendie de forêt dans le bassin du Rimbaud (Var, France). *Bull. Réseau Erosion*, ORSTOM Montpellier, **17** : 83-92.
- OLIVRY C. & HOORELBECK J. (1989) Erodabilité des terres noires de la vallée du Büech (France) *Cah. ORSTOM Pédol.* Paris, **25**, **1** : 95-110.
- REU C, SCOONES I. & TOULMIN C. (1996) Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique. CTA-CDCS-KARTHALA edn, 355 p.
- ROOSE E. (1972) Comparaison des causes de l'érosion et des principes de lutte antiérosive en régions tropicale humide, tropicale sèche et méditerranéenne. Comm. Journées Etude du Génie Rural, Florence : 417-441.
- ROOSE E. (1991) Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de LAE, la GCES. *Cah. ORSTOM Pédol.*, **26**, **2** : 145-181.
- ROOSE E., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M., MORSLI B. (1993) Erosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne d'Algérie : synthèse de 50 parcelles. *Cah. ORSTOM Pédol.*, **28**, **2** : 289-308.
- ROOSE E. (1994) Introduction à la gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES). *Bull. Sols FAO*, Rome, **70** : 420 p.
- ROOSE E. & BARTHÈS B. (2000) Organic matter management for soil conservation in Africa. *Nutrients Cycling in Ecosystems*, under press.
- SABIR M., ROOSE E, MERZOUK A., NOURI A. (1999) Techniques traditionnelles de gestion de l'eau et de lutte antiérosive dans deux terroirs du Rif occidental (Maroc). *Bull. Réseau Erosion Montpellier*, **19** : 456-471.
- RUBIO J.L. & ASINS S. (2000) Typology of traditional bench terracing at the comunidad Valenciana (Spain). Poster at the Third Int. Congress "Man and soils at the third millenium", Valencia, Spain, 28/3-1/4/2000.
- VAN WESEMAEL B., POESEN J., SOLÉ BENET A., CARABARRIONUEVO L, PUIGDEFABREGAS J.(1998) Collection and storage of runoff from hillslopes in a semi-arid environment : geomorphic and hydrologic aspects of the aljibe system in Almeria Province, Spain. *J of Arid Environment*, Academic Press, **40** : 1-14.
- WISCHMEIER W.H.& SMITH D.D. (1960) A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. Proc. 7th Congress Int. Soil Sci. Soc., **1** : 418-425.



# **MISE EN EVIDENCE DE LA CONTRIBUTION DES DEUX COMPOSANTES DE L'ÉCOULEMENT A LA PRODUCTION DE SEDIMENTS TRANSPORTES EN SUSPENSION DANS LES ZONES SEMI ARIDES : Cas de l'Oued Mouilah ( Nord Ouest Africain).**

Megnounif A., Terfous A., Bouanani A.

*Département d'Hydraulique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Aboubakr Belkaid Tlemcen  
BP. 119 Tlemcen 13000 ALGERIA, Tel : 213 7 28 56 85 Fax: 213 7 28 56 85 / 213 7 20 16 31*

## **RESUME.**

L'objectif de la présente étude est de mettre en évidence les taux de contribution de chaque composante de l'écoulement hypodermique et avec ruissellement dans la production des quantités de sédiments véhiculés par l'Oued Mouilah principal affluent d'un bassin versant Nord Africain.

## **INTRODUCTION**

Les populations des pays Nord Africains vivent de grands problèmes posés par l'insuffisance d'une eau qui devient de plus en plus rare ([1], [2]), dû d'une part à une pluviométrie aléatoire et irrégulière [3], et d'autre part, à la diminution des capacités de stockage résultant d'un envasement des retenues de barrages estimées dans ces régions à 100 millions de m<sup>3</sup> [4,5].

La connaissance de l'origine des sédiments produits par érosion hydrique, véhiculés par les cours d'eau, et susceptibles de se déposer dans les retenues de barrages, les estuaires, les ports et les plaines agricoles, s'avère importante pour lutter contre ce phénomène qui a suscité l'intérêt d'un nombre important de chercheurs, dont la méthodologie était basée sur le traitement des hydrogrammes de crues ([6] à [9]).

C'est dans cette optique, que ce travail s'inscrit. Basé sur une nouvelle approche, il consiste à déterminer la contribution des sédiments produits par écoulement hypodermique et par ruissellement, transportés en suspension par le cours d'eau Oued Mouilah.

## **PRESENTATION GENERAL DU SITE. – SITUE A L'EXTREME OUEST DE L'ALGERIE, L'OUED MOUILAH AFFLUENT RIVE GAUCHE DE LA TAFNA S'ECOULE SUR UNE LONGUEUR DE 124 KM, ET DRAINE UN BASSIN VERSANT DE 2650 KM<sup>2</sup>, DANS UN PERIMETRE DE 230 KM.**

Le bassin versant est peu allongé, l'indice de pente globale est faible et, est estimé à 11.59 m/km. Toute fois, sur moins de 15% de la surface globale représentant les montagnes situées en majorités au sud-est et au nord, les pentes s'accroissent et dépassent alors les 20%.

Le bassin se creuse dans du matériel à résistance fort variable. Sur le substratum schisto-quartzitique primaire et les formations carbonatées du secondaire, se sont déposés des sédiments du Tertiaire principalement des argiles et grès du Miocène et des alluvions Quaternaire occupant les bas fond des vallées et les plaines.

La région jouit d'un climat semi-aride inférieur. Elle est caractérisée par deux saisons humides a savoir l'automne et le printemps qui engendrent un flux important de matières solides en suspension, et qui alternent avec deux saisons sèches, où les étiages les plus importants sont enregistrés en été et parfois observés en hiver [10].

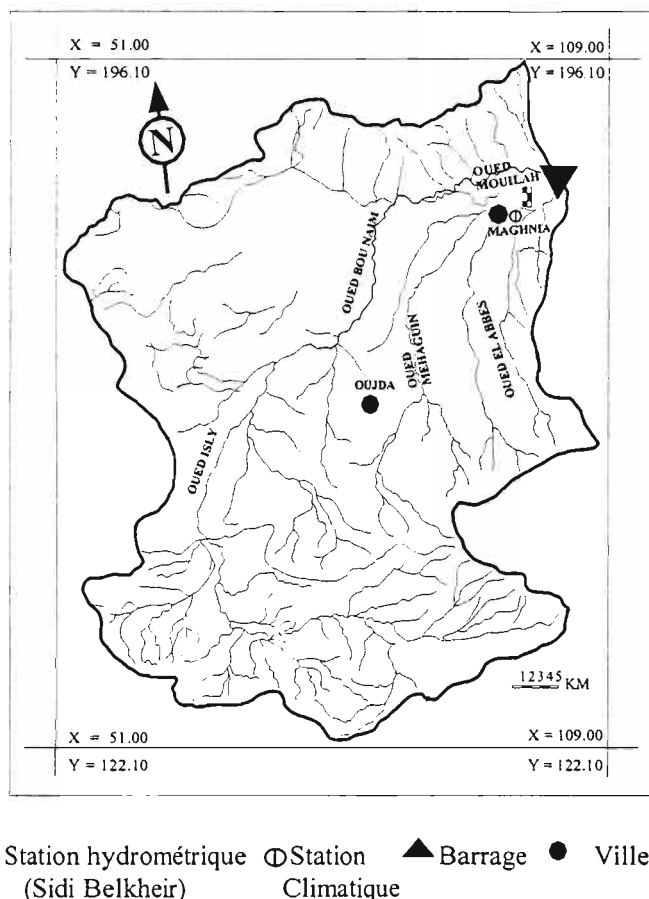


Fig. 1 : Situation et réseau hydrographique du bassin versant de l'Oued Mouilah.

## DONNEES HYDROLOGIQUES.

L'étude porte sur les valeurs instantanées des débits liquides  $Q_L$  données en  $m^3/s$  mesurés à l'exutoire du bassin versant durant la période allant de septembre 1977 à août 1993. A chaque mesure effectuée a été évaluée la charge de la matière en suspension obtenue à partir d'un échantillon d'eau prélevé sur les rives de l'oued. Après séchage, et élimination des matières organiques, la boue recueillie sur un papier filtre est pesée. On détermine ensuite la turbidité de l'eau, ainsi que le débit des matières solides  $Q_S$  évalué en  $kg/s$ .

Le nombre de prélèvements a été adopté au rythme hydrologique et donc intensifié en période de crue.

### Analyse des débits instantanés

Comme pour la plupart cours d'eau, le traitement des débits instantanés permet d'établir, une bonne relation en puissance entre le débit des matières solides en suspension et le débit liquide (figure 2).

Quoi que la relation semble être bonne, avec un coefficient de corrélation élevé  $R=0.90$ . On remarque sur la figure 2, que les débits forts sont plus étroitement liés que le reste des valeurs, où on note une variation large des débits solides pour des débits liquides peu variants. L'étendue du panache des points suivant la direction des débits solides est trop importante, et peut atteindre, voir dépasser une différence de  $1000 \text{ kg/s}$ .

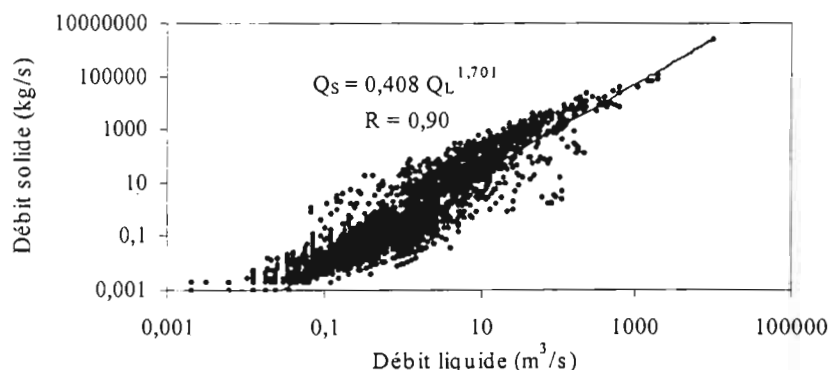


Fig. 2 : Relation entre les débits instantanés liquides et solides.

Ceci nous conduit à comparer (figure 3), les valeurs mesurées à l'exutoire du bassin, aux valeurs calculées par le modèle trouvé. On arrive alors à distinguer sur les deux graphes, figures 2 et 3, la formation de deux nuages denses de part et d'autre de la droite de pente 1.

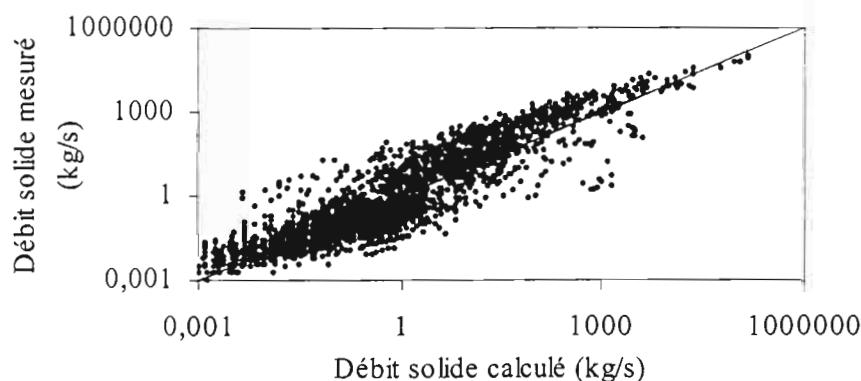


Fig. 3 : Comparaison des débits solides mesurés et calculés par le modèle

A ce stade, on conclut que la contribution du bassin versant dans la production des sédiments, véhiculés en suspension par le cours d'eau, peut varier d'une manière très significative pour des débits liquides de même intensité et atteint jusqu'à une tonne par seconde. Ceci nous incite à élaborer une approche misant au point la séparation entre les parts des sédiments, produits par écoulement hypodermique et par ruissellement, transportés en suspension par le cours d'eau.

#### Taux de contribution des composantes de l'écoulement dans la production des sédiments.

Une approche statistique basée sur la discrétisation des données instantanées en classes, a permis de réduire le nuage de points donné par la figure 4, et de mettre en évidence deux tendances d'évolution dont le point de rupture correspond à la moyenne géométrique.

Deux modèles sont alors établis :

$Q_s = 0,295 Q_L^{1,126}$ , production des sédiments par la contribution de l'écoulement hypodermique

$Q_s = 4,057 Q_L^{1,350}$ , production des sédiments par le ruissellement.

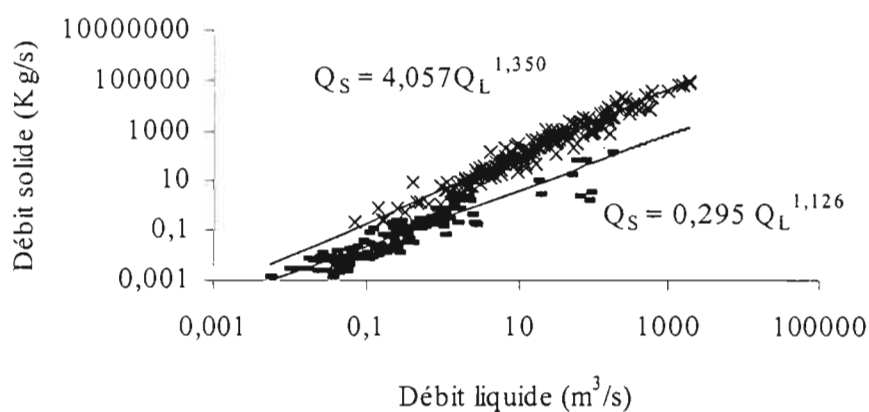


Fig. 4 : Tendances d'évolution des débits solides

Le taux instantané dans la production des sédiments par le ruissellement croît proportionnellement avec le débit liquide et varie entre 78 et 88% (figure 5).

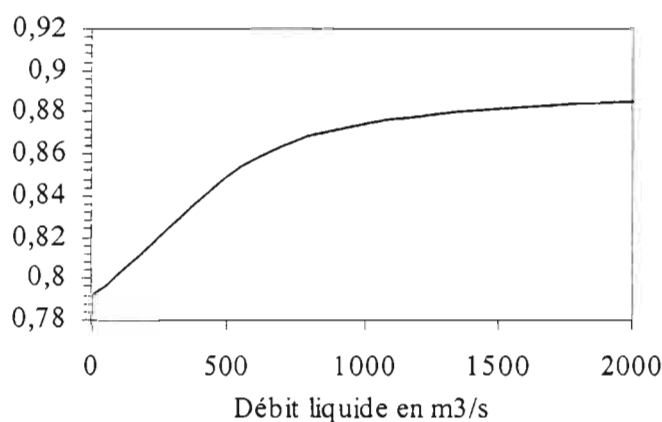


Fig. 5 : Taux instantané de production des sédiments par ruissellement

Un bilan des apports liquides et solides annuels ramenés à l'exutoire du bassin par les deux composantes de l'écoulement est alors établi (Tableau 1). Il est mis aussi en évidence le taux de contribution annuelle de chaque composante dans la production des sédiments.

TABLEAU 1. Bilan des apports et des contributions.

Année	A <sub>L</sub> Hm <sup>3</sup>	A <sub>SH</sub> MT	A <sub>SR</sub> MT	A <sub>S</sub> MT	Cont. Hypo%	Cont. Ruis %
77/78	50,732	0,097	0,052	0,149	0,652	0,348
78/79	32,697	0,002	0,004	0,007	0,350	0,650
79/80	117,811	0,059	0,616	0,675	0,087	0,913
80/81	79,826	0,029	0,127	0,156	0,188	0,812
81/82	13,119	0,004	0,014	0,019	0,240	0,760
82/83	33,337	0,007	0,001	0,008	0,881	0,119
83/84	29,164	0,010	0,016	0,026	0,372	0,628
84/85	20,542	0,008	0,008	0,015	0,499	0,501
85/86	13,119	0,004	0,014	0,019	0,240	0,760
86/87	106,374	0,060	2,672	2,732	0,022	0,978
87/88	22,248	0,008	0,175	0,184	0,045	0,955
88/89	55,512	0,047	0,159	0,206	0,227	0,773
89/90	70,315	0,035	0,376	0,411	0,084	0,916
90/91	62,888	0,031	0,438	0,469	0,066	0,934
91/92	58,101	0,016	0,251	0,267	0,059	0,941
92/93	14,362	0,004	0,018	0,022	0,190	0,810
<b>Moyenne</b>	<b>48,759</b>	<b>0,026</b>	<b>0,309</b>	<b>0,335</b>	<b>0,263</b>	<b>0,737</b>

A<sub>L</sub> : Apport liquide

A<sub>S</sub> : Apport solide total

A<sub>SH</sub> : Apport solide produit par écoulement hypodermique

A<sub>SR</sub> : Apport solide produit par ruissellement.

On note alors, un apport liquide moyen annuel de 48.7 millions de m<sup>3</sup> qui a engendré un apport solide total de 0.335 millions de tonnes, réparti en 0.026 millions de tonnes de sédiments produits par les écoulements hypodermiques et 0.309 millions de tonnes produits par ruissellement, soit des taux respectifs de 26.3% et 73.7%. La dégradation spécifique est estimée à 116.6 t/ km<sup>2</sup>/an.

La figure 6, montre d'une part, que la variation annuelle des apports solides est irrégulière, et d'autre part que c'est le ruissellement qui ramène le maximum de sédiments L'année 1986/87 à elle seule apporte un total de 2.67 millions de tonnes de sédiments, dont 98% sont produits par ruissellement.



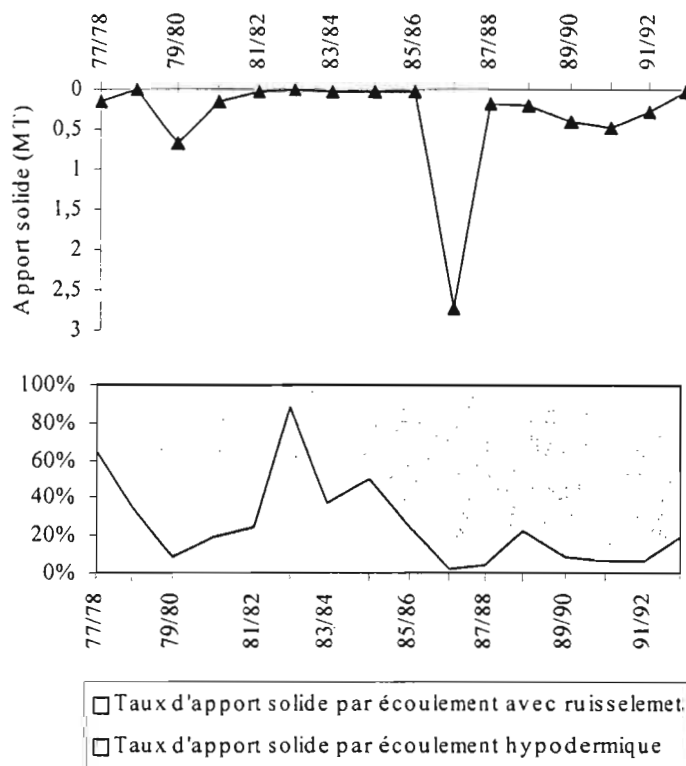


Fig. 6 :Variation annuelle des apports solides et taux des contributions

Les valeurs des taux de contribution, trouvées dans la présente étude, sont comparables a celles trouvées dans d'autres travaux de recherches réalisés pour des régions à climats similaires ou différents (Tableau 2)

TABLEAU 2. Quelques valeurs des taux de production des sédiments par écoulement hypodermique

Cours d'eau et régions	Taux de contribution de l'écoulement ypodermique	Référence
SENEGAL (afrique)	13 – 12 %	Kettan (1992), [11]
GIROU (France, Europe)	30 %	Etchanchu(1986), [12]
Rivières des USA (Amérique)	24 %	Robinson (1977), [13]
Mouilah (Algérie, Nord Afrique)	26 %	Présente étude

## CONCLUSION

On s'est intéressé dans la présente étude à évaluer les quantités de sédiments transportés en suspension dans un cours d'eau des zones semi-arides africaines, en l'occurrence l'Oued Mouilah. Ces quantités sont estimées à 0.335 millions de tonnes par an, dont 26.3% est produite par les écoulements hypodermiques et 73.7 % par ruissellement, ce qui correspond à une dégradation spécifique des versants de 116.6 t/km<sup>2</sup>/an.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- S. RIAD and A. SALIH (1999), Options for future water security in the Arab countries. Proc. First Int. Conf. On the Geologie of Africa, Assiut, Egypt, Nov. 23-25, pp. 91-98.
- A. BOUANANI , A. TERFOUS, M. BENSLIMANE and ZEA CHERIF (1999), Resources and stocks of water of Algeria, Proc. First Int. Conf. On the Geologie of Africa, Assiut, Egypt, Nov. 23-25, pp. 99-104.

- A. MEGNOUNIF, A. BOUANANI, A. TERFOUS & K. BABA HAMED (2000), Distribution statistique de la pluviométrie et mise en évidence de l'influence du relief. (Cas des monts de Tlemcen, Nord Ouest Algérien). *Revue Sciences & Technologie* n°12, pp.77-80.
- L. DJEZIRI (1998), L'envasement des barrages. *Revue Symbiose* n°2, pp. 18-21,.
- B. REMINI, (1999), L'envasement des barrages maghrébins. *Bul. Int. de l'Eau, Edil Infeau*, n°23, pp 7-11.
- J. L. PROBST and N. SIGHA (1989), Estimation de l'écoulement superficiel et de sa charge en suspension sur quelques grands bassins fluviaux du monde. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t.309, Série II, pp. 357-363.
- J. L. PROBST and A. BAZERBACHI (1986), Transports en solution et en suspension par la Garonne supérieure. *Sci. Geol. Bull.*, vol.39, n°1, pp. 79-98.
- J. LAMAS (1993), Hydrologie générale. Principes et applications. 2<sup>ème</sup> Edition, Gaëton Morin, Canada.
- V.T Chow, D.R. MAIDMENT & L. MAYS (1988), *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Inter. Edit. Civil Engineering Series
- A. TERFOUS, A. MEGNOUNIF & A. BOUANANI (2000), Etude du transport solide en suspension dans l'Oued Mouilah (Nord Ouest Algérien), soumis a la *Revue Hydrologie Continentale de l'ORSTOM*.
- Z. KATTAN, J.Y. GAC & J. L PROBST ( 1987), Suspended sediment load and mechanical erosion in the Senegal basin- Estimation of the surface runoff concentration and relative contributions of channel and slope erosion. *J. of Hydrology*, 92, pp.59-76.
- D. ETCHANHU & J. L. PROBST (1986), Erosion et transport de matières en suspension dans un bassin versant en région agricole. Méthode de mesure du ruissellement superficiel, de sa charge et des deux composantes du transport solide dans un cours d'eau. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 302, Série II, n°17, pp.1063-1068.
- A.R. ROBINSON (1977), Relationships between soil erosion and sediment delivery. In: *Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters* (Proc. Paris Symp., July 1977), *IASH Publ.* n° 122, pp. 159-167.



# ANALYSE MULTIVARIEE DE LA VARIABLE « EROSION SPECIFIQUE » : CAS DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MINA (WILAYA DE RELIZANE – ALGERIE).

Achite M. \*, Touaibia B.\*\*

\* *Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Faculté de Génie Civil et d'Architecture, Département d'Hydraulique. B.P. 1505 El Menaouar (31000)*

\*\* *Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique (E.N.S.H), B.P 31, Blida (09000)*

## RESUME

Les phénomènes érosifs, particulièrement sur sols argilo-marneux nus ont des conséquences à court, moyen et long termes néfastes voir graves sur l'environnement et s'expriment par une dégradation intensive des sols, des changements radicaux de profils d'Oueds, de comblement de lacs de barrages...

Le recours aux techniques statistiques notamment l'analyse en composantes principales et la régression multiple permet de mieux approcher ce phénomène. Appliquée sur le bassin versant de l'Oued Mina, l'analyse multivariée de la variable aléatoire «Erosion spécifique » a permis de rechercher des relations fonctionnelles, mettant en évidence les facteurs pouvant contribuer au phénomène de l'érosion hydrique.

## MOTS CLES

**Analyse multivariée, Erosion spécifique.**

## NOTATIONS

A.C.P	: Analyse en Composantes Principales
$C (g.l^{-1})$	: Concentration instantanée,
$C.V ( \%)$ .	: <b>Densité du Couvert Végétal</b>
$C_e ( \%)$	: <b>Coefficient d'écoulement</b>
$Dd ( Km^2. Km^{-1})$	: <b>Densité de drainage</b>
$Im ( \%)$	: <b>Pente</b>
$K_c$	: <b>Facteur de forme</b>
$L_r ( mm)$	: <b>Lame d'eau ruisselée</b>
$P ( mm)$	: <b>Pluie</b>
$Q_l ( m^3.s^{-1})$	: <b>Débit liquide instantané</b>
$Q_s ( kg.s^{-1})$	: <b>Débit solide instantané</b>
R.C	: <b>Retenue collinaire</b>
$S (Km^2)$	: <b>Surface</b>

## INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un phénomène complexe de part son caractère irrégulier, aléatoire et sa discontinuité spatio – temporelle. En raison de son ampleur et de son agressivité, elle constitue une contrainte majeure au développement de l'agriculture et à la promotion des activités rurales dans le pays.

Par ailleurs, le comblement des retenues par les sédiments est un phénomène de plus en plus préoccupant dans les pays du Maghreb et particulièrement en Algérie. Les estimations de la vitesse de sédimentation des retenues et la durée de vie de ces derniers nécessitent d'une part la connaissance des apports solides entrant dans la cuvette du barrage et d'autre part l'analyse des mécanismes de transfert et de dépôt à son amont.

L'envasement et la sédimentation restent un problème crucial et ne peuvent être résolus que si, une approche méthodologique de connaissance et de quantification du processus de l'érosion et de transport solide sont connues.

Ainsi, dans cette étude, nous examinons une approche statistique pour la détermination des facteurs favorisant l'érosion dans différents sous – bassins versants.

## MATERIEL ET METHODES

### Présentation de la région d'étude

Le bassin versant de l'oued Mina répond à notre étude en raison de sa situation géographique, sa forte érodibilité et à la disponibilité des données pluviométriques et hydrométriques. Situé à environ 300 Km à l'Ouest d'Alger, entre 0° 20' et 1° 10' de longitude Est et entre 34° 40' et 35° 40' de l'attitude Nord, le bassin versant de l'Oued Mina au droit du barrage de Sidi M'hamed Benouada draine une superficie de 4900 Km<sup>2</sup> ( fig.1).

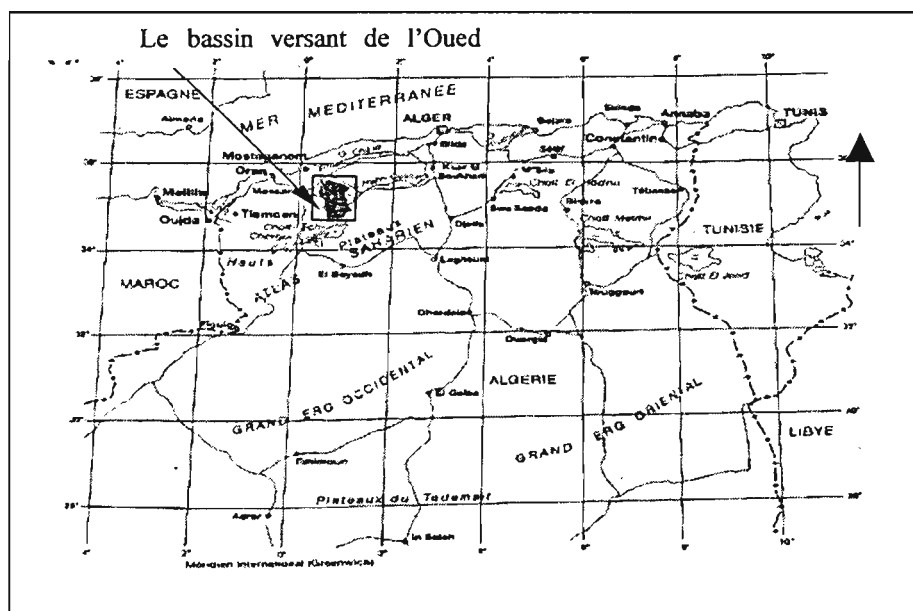


Fig. 1 : Situation du bassin versant de l'Oued Mina.

L'oued Mina est parmi les principaux affluents de l'Oued Chelif. Il parcourt une distance de 90 km environ entre les barrages de Bakhada et Sidi M'hamed Ben Aouda, avec une orientation Sud-Est, Nord-West.

Le bassin versant de L'Oued Mina comprend deux zones distinctes :

- La zone du Nord purement marneuse, fortement érodée et pratiquement déboisée.
- La zone jurassique du Sud moins érodée où environ 50% de surface sont recouvertes par une végétation de densité variable.

Le climat de la région est de type semi - aride méditerranéen ( pluies en hiver, sécheresse en été), avec une précipitation moyenne annuelle de 305 mm.

L'étude des précipitations a montré que la majorité des précipitations ont lieu de novembre à mars, à cette irrégularité annuelle s'ajoute une irrégularité interannuelle ( Dahel, 1991).

### Collecte et mise en forme des données

La collecte et la mise en forme des données, constitue la phase initiale de toute étude statistique (Ambroise, 1978 ), dont le but est l'exploitation des données hydrométriques à savoir :

- les débits liquides instantanés en m<sup>3</sup> . s ;
- les concentrations instantanées en g .l ;

- les débits moyens journaliers (  $\text{m}^3 \cdot \text{s}$  ).

En vue d'estimer l'érosion spécifique dans les sous bassins versants, l'analyse en composantes principales

( A.C.P) et la régression multiple pas à pas sont utilisées.

Les données d'observations sont mises sous forme d'un fichier contenant : numéro de l'observation , date, heure, hauteur d'eau, concentration, débit liquide, débit solide observé. Chaque fichier, correspond à une station hydrométrique, sur une période d'observations allant de 1973/74 à 1994/95. Les stations hydrométriques ( fig. 2) sont :

- Oued el Abtal sur l'Oued Mina : code : 013402 : Altitude : 205m - 1 -
- Sidi A.E.K sur l'Oued Haddad : code : 013401 : Altitude : 225m - 2 -
- Ain Hamara sur l'Oued abd : code : 013302 : Altitude : 300m - 3 -
- Kef-Mehboula sur L'Oued Taht : code : 013001 : Altitude : 475m - 4 -
- Takhmaret sur l'Oued Abd : code : 013301 : Altitude : 600m - 5 -

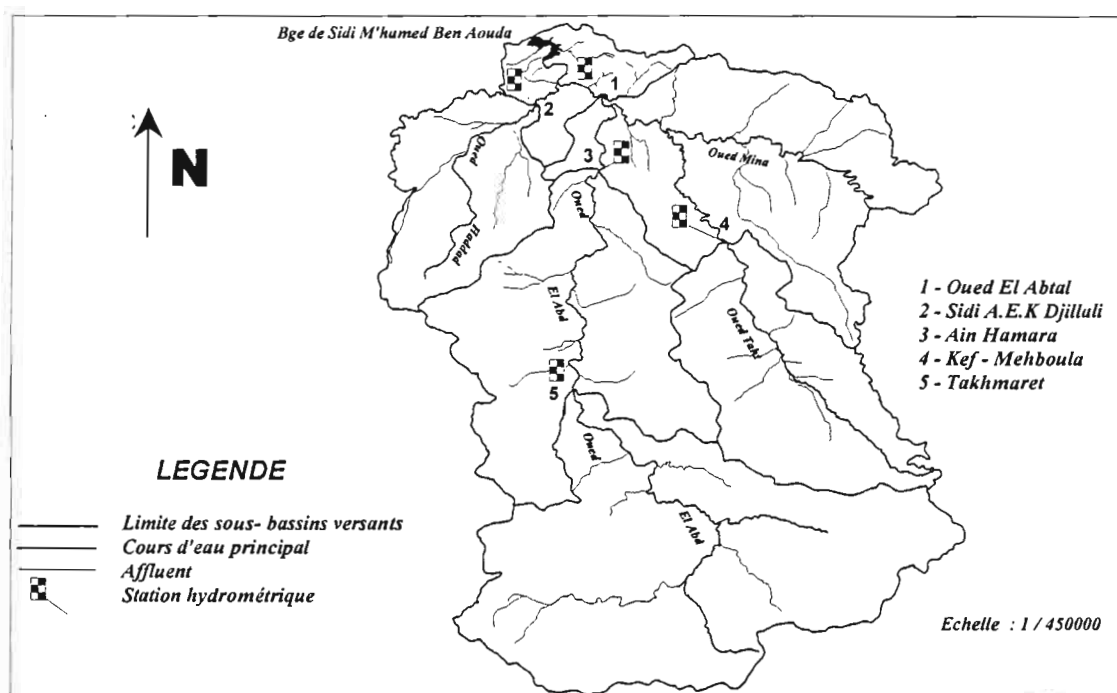


Fig. 2 : Implantation des stations hydrométriques du bassin versant de l'Oued Mina

N'ayant pas suffisamment d'informations, quant à la quantité de sédiments transportés en différents points du bassin versant, et pour une meilleure analyse multivariée, d'autres résultats ont été considérés.

Notons que les travaux de Gomer (1994) ont permis de connaître l'érosion dans les 6 micro bassins situés dans la zone des marnes.

Les travaux de Mostfeoui (1994) ont permis d'estimer l'érosion dans les retenues collinaires situées sur la rive gauche de Oued Haddad.

TABLEAU 1 : Caractéristiques hydromorphométriques et climatiques des différents sites.

Sites	S (Km <sup>2</sup> )	K <sub>C</sub> -	Im (%)	D <sub>d</sub> (Km . Km <sup>2</sup> )	P <sub>0</sub> (mm)	L <sub>0</sub> (mm)	Ce (%)	Couvert végétal (%)
MB1	0,762	1,1	28,70	18,00	232	34,80	15,00	0,00
MB2	0,441	1,23	29,30	18,00	215	28,00	13,08	0,00
MB3	0,562	1,20	33,30	22,00	263	29,00	11,03	0,00
MB4	0,713	1,51	33,80	27,00	256	10,20	3,98	0,00
MB5	0,217	1,21	34,00	7,00	302	6,90	2,28	75,30
MB6	0,265	1,20	37,10	6,00	314	5,30	1,69	64,20
RC1	8,64	1,35	52,54	7,12	343	33,70	9,83	00,00
RC2	5,35	1,57	52,77	6,34	343	33,90	9,88	00,00
RC3	1,46	1,62	39,87	6,27	343	34,20	9,97	00,00
RC4	13,39	1,40	40,99	5,43	343	33,50	9,77	00,00
1	4126	1,28	50,10	4,42	273	16,25	6,00	40,00
2	470	1,29	46,00	2,44	245	11,79	4,81	30,00
3	2480	1,23	48,00	3,70	251	7,84	3,12	61,00
4	680	1,26	58,30	4,07	332	12,84	3,87	21,00
5	1553	1,43	27,70	3,84	278	8,94	3,11	53,00
6	4900	1,26	56,60	4,48	332	14,86	4,00	45,00

L'homogénéisation des données (Achite, 1999) a montré que le modèle puissance répond au mieux à la relation :  $Q_s - Q_l$ , au vu du coefficient de détermination calculée pour une erreur de 1<sup>ère</sup> espèce  $\alpha = 5\%$  (Dagnellie, 1992).

Les modèles obtenus ont permis de quantifier au droit de chacune des 5 stations hydrométrique les apports en sédiments et l'érosion spécifique, et ce, à différentes échelles temporelles : journalière, mensuelle et annuelle.

Il y lieu de noter que pour l'analyse multidimensionnelle, seuls les modèles obtenus à l'échelle mensuelle sont appliqués en traitant les données mensuelles (Tableau 2), car la variation du débit solide au cours du mois n'est pas importante par rapport à la variation du débit solide au cours de l'année ( Achite et al. 1999).

Selon Gomer (1994), le transport solide charrié représente 15 % du transport solide en suspension.

TABLEAU 2 : Apport solide et érosion spécifique au droit des stations hydrométriques et le barrage de Sidi M'hamed Ben Aouda.

Bassins versants	Oued Mina	Oued Haddad	Oued El Abd	Oued Taht	Oued El Abd	Oued Mina
Stations Hydrométriques	Oued El Abtal (1)	Sidi A.E.K Djillali (2)	Ain Hamara (3)	Kef Mehboula (4)	Takhmaret (5)	Au droit du barrage (6)
As ( T . an <sup>-1</sup> )	1147794	156321	429214	191024	137164	1304115
Es ( T . Ha <sup>-1</sup> . an)	2,78	3.25	1.73	2.81	0.88	2.66

## Analyse multivariée de la variable « érosion spécifique »

Dans le souci de voir comment se comportent les bassins versants, considérés comme source de sédiments, nous avons effectué une analyse en composantes principales (A.C.P), où nous avons introduit l'ensemble des variables expliquées et explicatives. Cette analyse est effectuée sur les différentes variables, en nombre de 9 et les 16 individus ( tableau 3 ).

Les variables explicatives sont :

- la surface,  $S$  ( $\text{Km}^2$ );
- le facteur de forme,  $K_c$ ;
- la densité de drainage,  $D_d$  ( $\text{Km} \cdot \text{Km}^{-2}$ );
- la pente,  $Im$  ( % );
- la pluie,  $P$  ( mm );
- la lame d'eau ruisselée,  $L_r$  ( mm );
- le coefficient d'écoulement,  $C_e$  ( % );
- la densité du couvert végétal,  $C.V$  ( % ).

La variable expliquée est l'érosion spécifique (  $E_s$  ) en (  $\text{T.Ha}^{-1}$  ).

Les 16 individus constituent les différentes érosions calculées en différents points, du tableau 1.

TABLEAU 3 : Variables quantitatives de l'A.C.P

Individus	$E_s$ ( $\text{T.Ha}^{-1}$ )	$S$ ( $\text{Km}^2$ )	$K_c$ ( - )	$Im$ ( % )	$D_d$ ( $\text{Km} \cdot \text{Km}^{-2}$ )	$P_0$ (mm)	$L_0$ (mm)	$C_e$ ( % )	Couvert végétal ( % )
MB1	36,00	0,762	1,1	28,70	18,00	232	34,80	15,00	0,00
MB2	13,00	0,441	1,23	29,30	18,00	215	28,00	13,08	0,00
MB3	16,75	0,562	1,20	33,30	22,00	263	29,00	11,03	0,00
MB4	23,25	0,713	1,51	33,80	27,00	256	10,20	3,98	0,00
MB5	8,00	0,217	1,21	34,00	7,00	302	6,90	2,28	75,30
MB6	7,25	0,265	1,20	37,10	6,00	314	5,30	1,69	64,20
RC1	23,70	8,64	1,35	52,54	7,12	343	33,70	9,83	00,00
RC2	23,75	5,35	1,57	52,77	6,34	343	33,90	9,88	00,00
RC3	23,78	1,46	1,62	39,87	6,27	343	34,20	9,97	00,00
RC4	23,71	13,39	1,40	40,99	5,43	343	33,50	9,77	00,00
SB1	2,78	4126	1,28	50,10	4,42	273	16,25	6,00	40,00
SB2	3,25	470	1,29	46,00	2,44	245	11,79	4,81	30,00
SB3	1,73	2480	1,23	48,00	3,70	251	7,84	3,12	61,00
SB4	2,81	680	1,26	58,30	4,07	332	12,84	3,87	21,00
SB5	0,88	1553	1,43	27,70	3,84	278	8,94	3,11	53,00
E.B	2,66	4900	1,26	56,60	4,48	332	14,86	4,00	45,00

### Analyse en composantes principales

#### Principe de la méthode

Le but de cette méthode est de réaliser un ou plusieurs graphiques, à partir d'un tableau de données tout en réduisant les dimensions de l'espace de représentation de celle-ci et en essayant de ne pas perdre trop d'information au moment de cette réduction. Aussi, il suffit de déterminer, les axes de projection qui sont les plus aptes à représenter correctement une construction.(Philippeau, 1992).

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'analyse des résultats obtenus par l'A.C.P comprend :

- En premier lieu, l'analyse du pourcentage de la variance totale expliquée par chaque composante principale, afin de dégager les axes les plus importants;



- Ensuite, l'étude des liaisons entre les axes et les variables;
- Enfin, l'examen de la matrice de corrélation montrant la relation qui peut exister entre les variables.

### Valeurs propres

Les valeurs propres et le pourcentage d'inertie de chaque composante est mentionné dans le tableau 4. Nous remarquons que la première composante a une valeur propre de 4,27 et explique 47,48% d'inertie. La seconde composante a une valeur de 2,17 et explique que 24,05% de la variation totale. Nous remarquons également que seulement 10,33 % des informations sont expliquées sur l'axe 3 . De ce fait, nous avons jugé utile de s'intéresser uniquement aux deux premiers axes car ils totalisent 71,54 % de l'information totale.

TABLEAU 4 : Valeurs propres et pourcentage d'inertie.

Axe	Valeurs propres	Pourcentage d'inertie	Cumul
1	4,27	47,48	47,48
2	2,17	24,05	71,54
3	0,93	10,33	81,87
4	0,74	8,18	90,04
5	0,42	4,65	94,69
6	0,30	3,37	98,06
7	0,13	1,45	99,51
8	0,04	0,45	99,96
9	0,004	0,04	100,00

### Etude des variables

Les variables : Es, S, Dd, Lr, Ce et C.V , présentent sur l'axe 1 une meilleure variation, au vu du carré de la corrélation obtenue. Ces coefficients varient de 0,39 pour la surface à 0,85 pour le couvert végétal (Tableau 5). Sur le même axe, les coordonnées de la surface, couvert végétal, pente moyenne et de la pluie sont négatives, alors que ceux de l'érosion, le coefficient d'écoulement et la lame d'eau ruissellée sont positives; par conséquent ces derniers se trouvent de part et d'autre de l'axe 1. La variable fortement représentée est le couvert végétal avec un carré de la corrélation est de 0,85. Nous remarquons, en général, que la dispersion sur l'axe 2 est considérable vu les faibles corrélations obtenues.

TABLEAU 5: Corrélation et contribution des variables étudiées.

Paramètres	AXE 1		AXE 2	
	coordonnées	Corrélation	coordonnées	Corrélation
Es	0,91	0,84	-0,11	0,01
S	-0,63	0,39	-0,17	0,03
Kc	0,30	0,09	-0,60	0,35
Im	-0,39	0,15	-0,74	0,55
Dd	0,65	0,42	0,55	0,30
P <sub>0</sub>	-0,12	0,01	-0,85	0,72
L <sub>0</sub>	0,85	0,73	-0,39	0,15
Ce	0,89	0,79	-,05	0,00
Couv. Vég.	-0,92	0,85	0,21	0,05

## Etude de graphique

La projection des variables sur le plan ( 1 - 2 ) nous permet de conclure que du côté négatif de l'axe 1, nous trouvons la surface, la pente, la pluie et couvert végétal , par contre, du côté positif nous trouvons l'érosion, la densité de drainage, le coefficient d'écoulement et la lame d'eau ruissellée (fig.3).

Cette remarque montre qu'il existe une relation inversement proportionnelle entre ces variables. En effet, si le taux de la végétation augmente l'érosion et le ruissellement diminuent. La position intermédiaire de coefficient de forme ( Kc) sur l'axe 1 ne lui confère aucune influence sur l'érosion et le ruissellement.

L'étude des individus montre que les micros bassins 1, 2, 3 , 4 et les différents sites des retenues collinaires forment un groupe distinct ( I ). Ils sont surtout influencé par l'absence du paramètre végétation et le taux très élevé de l'érosion. Les bassins versant portant les numéros 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12 formant un autre groupe (II) influencé par le paramètre végétation.

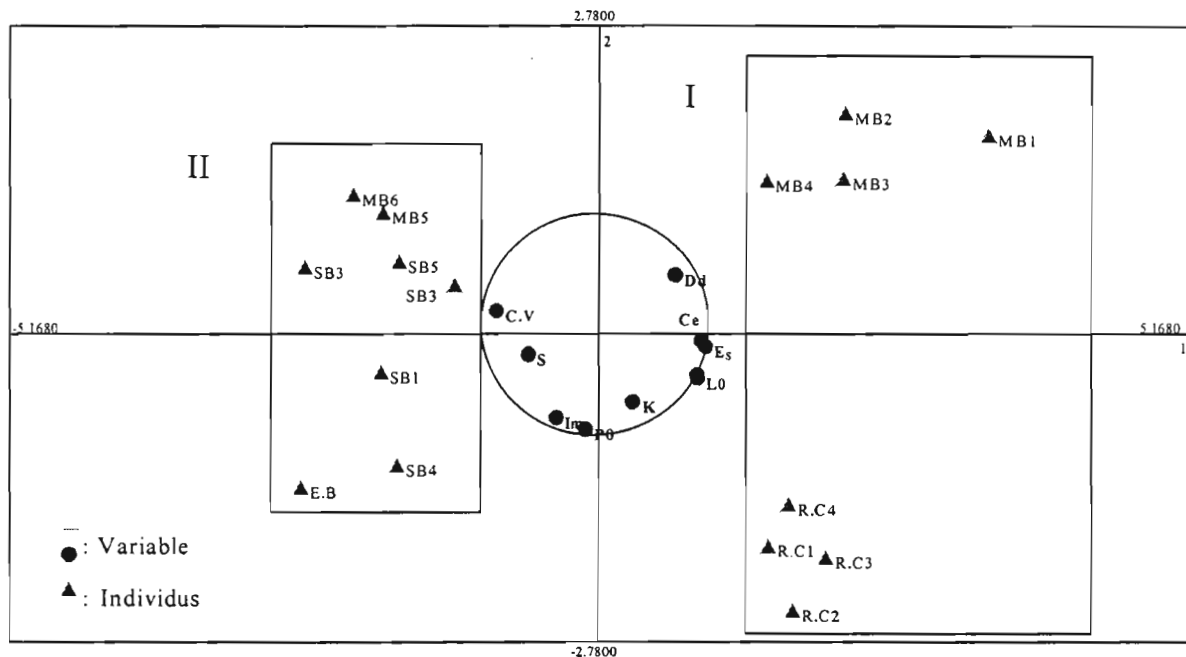


Fig. 2 : Projection des variables et les individus sur le plan ( 1 - 2 )

## Analyse de la matrice de corrélation

Cette analyse statistique a permis de définir et de déterminer les variables explicatives de l'érosion. Le tableau 6 montre les valeurs des coefficients de corrélation qui existent entre les différents variables.

Il en ressort du tableau 6, que la corrélation est significative entre l'érosion et quelques variables. La corrélation est significative entre l'érosion et la surface au seuil critique de 5%, avec  $r = 0,59 > 0,497$ .

Le signe moins de coefficient de corrélation explique qu'il existe une relation inversement proportionnelle entre les deux variables.

De même, la corrélation est aussi significative entre l'érosion et la densité de drainage, la lame d'eau ruissellée, le coefficient d'écoulement et le couvert végétal, au seuil critique de 5%, les coefficients de corrélation sont respectivement égaux à 0,55, 0,79, 0,76 et -0,80. La densité du couvert végétal influe considérablement sur l'érosion mécanique. En effet, les feuilles des végétaux interceptent la pluie, réduisent l'énergie cinétique des gouttes d'eau et leur pouvoir érosif.

Avec un degré moins, la corrélation est aussi distinguée entre l'érosion, la forme du bassin et la pente moyenne du bassin, avec des coefficients de corrélation respectivement égaux à 0,28 et -0,29. La vitesse des filets liquides et le pouvoir érosif de l'eau de ruissellement sont évidemment directement proportionnels à la pente du versant, si bien que les bassins de grande taille se caractérisent par une pente généralement faible et par un indice d'érosion mécanique également faible. De plus, les bassins de grande taille présentent tous, un aval long et de faible pente où l'alluvionnement est favorisé, si bien que le taux d'érosion mécanique semble diminuer alors que la superficie du bassin augmente.

L'effet de la pluie semble n'avoir aucune influence sur le ruissellement et sur l'érosion dans le cas où le bassin serait bien protégé.

TABLEAU 6 : Matrice de coefficients de corrélation .

Paramètres	Es ( T .Ha <sup>-1</sup> )	S ( Km <sup>2</sup> )	K <sub>C</sub>	Im ( % )	D <sub>d</sub> (Km .Km <sup>-2</sup> )	P <sub>0</sub> ( mm )	L <sub>0</sub> ( mm )	Ce ( % )	Couvert végétal ( % )
Es ( T . Ha <sup>-1</sup> )	1,00								
S ( Km <sup>2</sup> )	-0,59	1,00							
K <sub>C</sub>	0,28	-0,10	1,00						
Im(%)	-0,29	0,46	0,15	1,00					
D <sub>d</sub> (Km .Km <sup>-2</sup> )	0,55	-0,40	-0,03	-0,56	1,00				
P <sub>0</sub> ( mm )	0,07	0,01	0,39	0,54	-0,51	1,00			
L <sub>0</sub> ( mm )	0,79	-0,35	0,33	-0,02	0,25	0,19	1,00		
Ce ( % )	0,76	-0,37	0,11	-0,24	0,44	-0,17	0,93	1,00	
Couvert végétal ( % )	-0,80	0,45	-0,45	0,10	-0,55	0,02	-0,85	-0,83	1,00

### Relation : Erosion spécifique - variables explicatives

Pour mieux cerner l'effet de la variation spatiale de l'érosion. Nous avons ainsi procédé à une analyse multivariée, afin d'établir un modèle explicatif entre l'érosion et les variables explicatives, déterminées déjà après une analyse en composantes principales. Cependant, le recours aux techniques d'analyse statistique par la régression multiple a permis de déterminer la relation entre les variables explicatives et celle à expliquer. Les études déjà faites ont montré que la relation qui peut exister entre l'érosion, les caractéristiques hydromorphométriques du bassin et les caractéristiques climatiques, n'est plus linéaire. Pour cela, nous avons transformé les données en logarithme, afin de trouver la relation correspondante. En premier lieu, nous avons essayé de trouver un modèle avec la totalité des variables, ensuite nous avons procédé à l'élimination de la variable qui présente le plus faible coefficient de corrélation.

Il est à noter, que pour la signification de coefficient de corrélation multiple, nous avons calculé à chaque fois, la statistique « F<sub>obs</sub> » qui est égale à :

$$F_{obs} = \frac{(n-p-1)(R^2)}{p(1-R^2)}$$

avec, p-1 et n-p-1 degrés de liberté, où n est le nombre d'observation et p c'est le nombre de variables explicatives. Cette valeur calculée doit être comparée avec une valeur théorique

F<sub>(1,α)</sub>, pour α = 5% ( Dagnellie, 1992).

Les relations trouvées sont présentées dans le tableau 8.

TABLEAU 7 : Relations entre l'érosion spécifique et les variables explicatives.

Relation du modèle.	Coefficient de corrélation multiple
$Es = 0,50 \cdot S^{-0,183} \cdot Kc^{-0,627} \cdot Im^{1,161} \cdot Dd^{-0,101} \cdot Ce^{-0,045} \cdot (C.V)^{-0,368}$	0,97
$Es = 0,62 \cdot S^{-0,18} \cdot Kc^{-0,710} \cdot Im^{1,145} \cdot Dd^{-0,113} \cdot (C.V)^{-0,3388}$	0,97
$Es = 0,32 \cdot S^{-0,175} \cdot Kc^{-0,557} \cdot Im^{1,239} \cdot (C.V)^{-0,365}$	0,97
$Es = 15,08 \cdot S^{-0,236}$	-0,82

Il est à noter que le dernier modèle a été utilisé pour la prédiction de l'érosion spécifique dans des bassins non jaugés ou non étudiés.

## CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons procédé à une approche statistique pour la quantification du transport solide, la détermination des principaux facteurs limitant ce dernier afin de prévenir l'envasement du barrage de Sidi M'hamed Ben Aouada.

A cet effet, les moyens mis à notre disposition sont les données hydrométriques instantanées relatives au débit instantané, à la concentration et les débits moyen journalier dans les stations hydrométriques : Oued El Abtal sur l'Oued Mina, Sidi A.E.K Djillali sur l'Oued Hadda, Kef Mehboula sur l'Oued Taht et Ain Hamara, Takhmaret sur l'Oued Abd, et ce sur une période de 22 ans allant de 1973 / 74 à 1994 / 95.

Par ailleurs, les fichiers de données instantanées présentent des lacunes qu'il convenait de combler. Ainsi la majeure partie du travail était de l'homogénéiser, de rechercher le modèle le plus significatif reliant entre les données des débits liquides à celle de débits solides.

L'homogénéisation de la série du transport solide aux différentes stations a été la tâche la plus délicate. Le modèle régressif obtenu pour les différentes échelles temporelles est le modèle puissance, expliquant dans la plupart des cas plus de 70 % de la variation.

Les modèles obtenus à l'échelle mensuelle ont permis de quantifier l'érosion dans les sous - bassins versants.

Le recours aux techniques statistiques (A.C.P et la régression multiples) a permis de sélectionner les principaux facteurs favorisant l'érosion. L'A.C.P montre que l'érosion est bien corrélée avec le coefficient d'écoulement, le couvert végétal, la surface et la lame d'eau ruissellée dont les valeurs des coefficients de corrélations « r » sont respectivement égaux à : 0,76 ; -0,80; -0,59 et 0,79.

L'étude de l'érosion et du transport solide dans les zones semi-arides a permis de préciser les paramètres mis en jeu et de quantifier le phénomène pour une éventuelle mise au point de techniques d'aménagement anti-érosives appropriées pour la sauvegarde et la préservation du capital : eau - sol.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHITE M., 1999 Analyse multivariée de la variable « Erosion Spécifique » : cas du bassin versant de l'Oued Mina, thèse de Magister, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique, Algérie, 206p.
- ACHITE M., TOUAIBIA B., 1999 Approches statistiques d'homogénéisation des données de transport solide. Cas de la station de Sidi A.E.K. Djillali. Bassin versant de l'Oued Haddad. Journées d'études de PHI, AMHY – FRIEND, COSENZA (Italie), Oct 1999.
- AMBROISE B., 1978 Modèle mathématique dynamique en géologie physique. Revue de géographie de l'Est, N° 3, université de l'Est de France. CNRS. France, pp 149-167.
- DAHEL A., 1991 Répartition spatiale de la pluie du bassin versant de l'Oued Mina. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en hydraulique agricole. INES. Agronomie de Chlef. Algérie, 95p.
- DAGNELLIE P., 1992 Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. Les presses agronomiques de Gembloux ( Belgique), 463p.
- GOMER D., TOUAIBIA B., 1991 Détermination de l'érosion spécifique sur parcelles expérimentales et bassin. Bassin versant de l'Oued Mina (Relizane). Actes du colloque sur l'érosion des sols et l'envasement des barrages, 1-3 Déc., ANRH, GTZ( DEUTSCH), édition Informahyd, Alger, pp. 105 – 115.
- GOMER D., 1994 Ecoulement et érosion dans les petits bassins versants à sols marneux sous climats méditerranéen. Université Karlsruhe, Allemagne, 205 p.
- MOSTEFAOUI M., : Quantification de l'érosion à partir d'installation de quatre retenues collinaires dans la zone des marnes du bassin versant de l'Oued mina. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en hydraulique agricole. INES. Agronomie de Chlef. Algérie
- PHILIPPEAU G., 1992 Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales?. Institut Technique des céréales et des Fourrages (I.T.C.F), Paris, France, 63pp.



# APPLICATION D'UN MODELE GEOMORPHOLOGIQUE POUR LA SIMULATION D'UNE CRUE EXCEPTIONNELLE ARRIVANT DANS UN PETIT BARRAGE.

Nasri S.\*, Albergel J.\*\*, Duchesne J.\*\*\*

\* *Chargé de Recherche, INRGREF, B.P. 10 Ariana 2080*

\*\* *Directeur de Recherche, Mission IRD, B.P. 434, 1004 Tunis*

\*\*\* *Professeur, INH Angers, France*

## RESUME :

Au début de la décennie 90 le ministère de l'agriculture tunisien s'est lancé dans un ambitieux programme de construction de petits barrages dans la partie septentrionale du pays. Aujourd'hui plus de 500 retenues artificielles ont vu le jour. Elles résultent d'un barrage en terre compactée et muni d'un déversoir latéral. Ces ouvrages hydrauliques rustiques ont pour talon d'Achille le passage d'eau au dessus de la digue. Dans ce cas, l'ouvrage rapidement fragilisé peut partir au cours de l'eau.

Dans le cadre du programme de recherche européen «HYDROMED» une étude sur la simulation de crue exceptionnelle et de ses effets dans le barrage a été menée. Sur deux lacs où des observations de niveau de l'eau et de pluviométrie sont réalisées depuis 1994 nous avons reconstitué les crues entrant dans le lac. La chronique pluie - débit ainsi obtenue a servi au calage d'un modèle simple basé sur la décomposition de la pluie brute en pluie d'imbibition, pluie interceptée, pluie infiltrée et pluie nette pour ce qui concerne la fonction de production et du modèle H2U basé sur les chemins hydrauliques en ce qui concerne la fonction de transfert. Par ailleurs une étude statistique des pluies journalières et de la pluviographie a été réalisée et a permis de simuler les hyétogrammes de pluies exceptionnelles (réurrence de 5,10, 20 et 50 ans).

## INTRODUCTION

En Tunisie Centrale, dans la dorsale semi-aride, depuis le Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne, l'Etat tunisien a construit environ 300 petits barrages en terre avec des déversoirs simples de type déversoir fusible. Ces aménagements sont très sensibles aux crues violentes. Plus que le volume de la crue, c'est sa forme et la valeur de son maximum qu'il faut chercher à prédéterminer pour dimensionner les déversoirs de crues.

Pour un volume d'eau écoulé, la forme de l'hydrogramme dépend de la forme du bassin versant, des chemins hydrauliques et de leur hiérarchisation et enfin des pentes ; en un mot de la géomorphologie du bassin. Rodriguez et Iturbe (1979) ont présenté une modélisation physique du transfert hydraulique dans un bassin versant. Dans le même esprit, et en alliant la théorie des fractales et de la physique statistique, le modèle H2U, pour «Hydrogramme Unitaire Universel», (Cudennec et Duchesne; 1997) a été développé, validé et appliqué en différents lieux depuis 1994. Il s'agit d'une conceptualisation des processus de transformation de la pluie en débit dont l'originalité et la force résident dans le déterminisme de la fonction de transfert.

Ce modèle a pour originalité de reposer entièrement sur une description déterministe de l'organisation spatiale du réseau hydrographique. Il se prête donc très bien aux études d'impact d'aménagements tels que les retenues collinaires, les aménagements de versants ou de bas-fonds qui vont modifier les chemins de l'eau.

La fonction de transfert ne nécessite pas de calage, puisque ses paramètres d'entrée sont directement issus des caractéristiques morphologiques du réseau.

Dans cette communication, les auteurs présentent une application de ce modèle sur deux petits bassins versants semi-arides du réseau de surveillance des lacs collinaires de Tunisie (Nasri et al; 1997). Ces deux retenues ont des impluviums allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole. La superficie de leur bassin versant est de 316 ha pour Dékekira et 1763 ha pour El Gouazine. Ils sont représentatifs de la zone semi-aride à 350 mm de précipitation interannuelle.

Le modèle est ensuite appliqué pour ces deux bassins sur des hyétogrammes définis suite à une étude statistique des pluviométries journalières et de la relation intensité-durée-fréquence.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme HYDROMED (Albergel et Rejeb, 1997). Les données hydro pluviométriques proviennent de la banque de données DCES / IRD (1996 à 2000)

## DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODES

### Données géographiques

Les deux bassins étudiés se trouvent en Tunisie Centrale sur le piémont du Jbel Serj à une dizaine de km de la ville d'Ousseltia. Leurs exutoires matérialisés par des petits barrages en terre ont pour coordonnées géographiques :

El Gouazine	35°54' 30" Nord	9°42'13" Est
Dékekira	35°53' 04" Nord	9°40'53" Est

Les bassins versants sont deux petites vallées creusées dans les alluvions anciennes encroûtées du Pléistocène. Le bassin versant de El Gouazine, plus grand, est dominé en rive gauche par des barres calcaires de l'Eocène. Les sols sont peu épais et encroûtés sur les parties hautes, ce sont des lithosols et des sols calcimagnésiques à fortes charges caillouteuses. Dans les parties aval, les sols alluviaux profonds argilo-limoneux alternent avec des sols calcimagnésiques à amas calcaires. A Dékekira et sur une petite surface de rive gauche à El Gouazine, on trouve des sols peu évolués, régosoliques sur marnes gypseuses à l'origine d'efflorescences salines.

Le climat est du type méditerranéen semi-aride. Il se caractérise par des pluies annuelles très irrégulières et très variables dans le temps et dans l'espace, une saison humide qui s'étend de septembre à mai et une saison estivale chaude et sèche. Les pluies sont souvent sous forme d'orages violents et de courte durée. Les intensités horaires maximales dépassent facilement les 50 mm/heure voire même 100 mm/heure pour des pluies de durée inférieure à la demi-heure.

Le régime pluviométrique irrégulier se répercute évidemment sur le régime hydrologique. L'écoulement de surface des cours d'eau est très irrégulier, les étiages sont très bas, les crues sont soudaines et violentes et les volumes d'eau importants. Les oueds charrient pendant les crues des volumes de terre importants arrachés essentiellement aux berges mais aussi à la surface des versants. L'érosion régressive est importante, surtout dans cette zone de tectonique récente ; les transports de fond d'oued sont conséquents (Benzarti, Z. ; 1995).

### Installation expérimentale d'un lac collinaire et acquisition des données

Les lacs collinaires de Dekkira et El Gouazine sont équipés chacun d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et de deux centrales d'acquisition automatique de données ; la première est reliée à un capteur pluviométrique à augets basculeurs (0,5mm de pluie) et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au cm près et sa température. L'évacuateur de crues est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits. Les données caractérisant le bassin versant, la retenue et la station de mesures hydrologiques sont consignés dans une banque de données géo - référencées. Celle-ci est remise à jour après chaque modification de l'appareillage, nouvelle mesure de la bathymétrie ou changement constaté de l'occupation des terres.

La bathymétrie de chaque lac est effectuée au moins une fois par année hydrologique. Elle est rapportée au nivellement fin du site et permet d'apprécier le taux d'envasement de la retenue et d'établir les courbes « Hauteur / Volume et Hauteur / surface ».

Ce dispositif expérimental permet de reconstituer une chronique de pluie débit à l'exutoire de chaque bassin par la méthode du bilan hydrologique (Albergel et Rejeb, 1997). Nous avons obtenu la reconstitution de 24 crues à Dékikéra observées entre le 04/11/1993 et le 30/08/1997 et de 14 crues à El Gouazine pendant la même période.

La figure 1 montre l'exemple de la reconstitution de la crue du 13/09/1995 à Dekikéra. Cette crue a pour volume 15 838 m<sup>3</sup> et pour débit de pointe 10,33 m<sup>3</sup>/s.

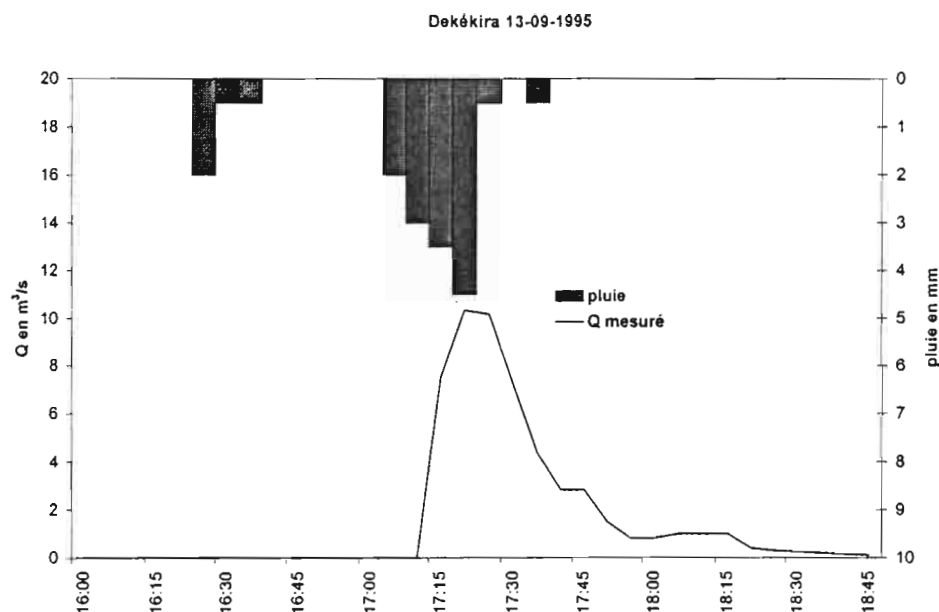


Fig. 1 : Reconstitution de la crue du 13/09/1995 à Dékekira

### Choix des crues utilisées pour la modélisation

Pour la modélisation nous avons pris toutes les crues consécutives à une averse supérieure à 10 mm de lame ruisselée supérieure ou égale à 0,5mm et de temps de base inférieure à 12 h pour s'affranchir des crues résultant de hyétogrammes complexes. Vingt sept crues ont été sélectionnées à Dékekira et quatorze crues à El Gouazine. Les tableaux 1 et 2 montrent les caractéristiques des crues les plus fortes observées sur ces bassins.

TABLEAU 1 : caractéristiques de quelques crues enregistrées à Dékekira.

Bassin versant de Dékekira							
Date de la crue	Pluie totale en mm	Temps de réponse en mn	Volume ruisselé en m <sup>3</sup>	Débit max. en m <sup>3</sup> /s	Coefficient de ruissellement en %	Temps de montée en mn	Temps de base en mn
03/10/94	30	15	35 273	14,25	37,2	25	35
13/09/95	18,5	16	15 838	10,41	27,2	15	65
20/09/95	20	21	31 155	13,9	49,3	25	85
13/01/96	24,5	15	6 320	1,53	8,12	70	185

TABLEAU 2: caractéristiques de quelques crues enregistrées à El Gouazine.

Bassin versant d'El Gouazine							
Date de la crue	Pluie totale en mm	Temps de réponse en mn	Volume ruisselé en m <sup>3</sup>	Débit max. en m <sup>3</sup> /s	Coefficient de ruissellement en %	Temps de montée en mn	Temps de base en mn
03/10/94	32,5	21	122 250	28,83	21	70	280
13/09/95	12	35	28 000	10,08	13	25	115
20/09/95	26,5	39	136 440	35	28,5	95	190
13/01/96	24	48	15 521	2,27	3,6	80	300



## La statistique pluviométrique et intensités - durées - fréquences

L'étude statistique des pluies journalières a été réalisée sur les données de la station de Oussletia observées de 1967 à 1994. Une loi de Pearson III tronquée a été ajustée sur l'ensemble des observations. Les récurrences théoriques sont calculées à partir du nombre moyen de pluie supérieures au seuil de troncature par an. Le tableau 3 donne les valeurs de cette statistique :

TABEAU 3: pluie journalière pour une récurrence de 5,10,20 et 50 ans (CES-IRD, 1998).

Période de				
fréquence				
Pluie journalière				

La détermination des intensités durées fréquences a été réalisée à partir des postes pluviographiques de Dékekira, El Gouazine, Fidh Ali observées depuis 1994 et considérés comme une seule station de 15 années. Cette approximation méthodologique est acceptable vu que les pluviographes se trouvent dans une même région climatique à des altitudes comparables et avec la même exposition par rapport aux vents dominants. Les hyétogrammes observés sont classés et découpés, puis une loi statistique est calée sur chaque tranche horaire de calcul des intensités. Le tableau 4 résume les résultats de cette statistique (CES-IRD, 1998).

TABEAU 4 : Intensités (mm/h)- durées (mn) - Fréquences des pluies dans la région

Fréquence	Durée en mn	5	10	15	30	45	60	90	120	180
0.2	5 ans	49	37	31	24	23	22	18	15	13
0.1	10 ans	78	60	52	43	36	34	29	21	19
0.05	20 ans	198	157	137	92	66	52	43	33	26
0.02	50 ans	300	170	120	65	48	35	27	20	15

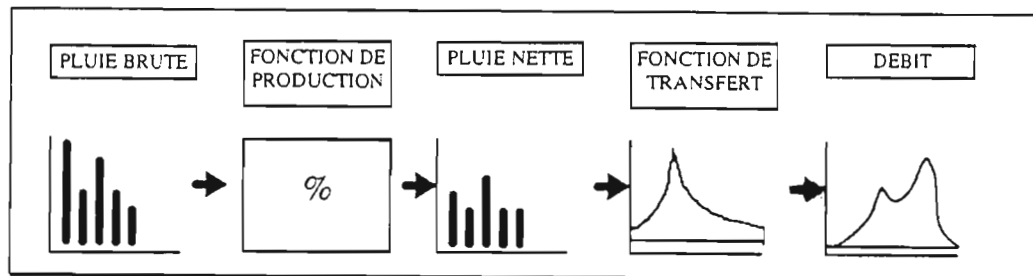


Fig. 2 : Articulation d'un modèle pluie-débit (d'après Cudennec ;1997)

## Principe du modèle utilisé

Comme beaucoup de modèles pluie-débit, H<sub>2</sub>U s'articule autour de deux fonctions (Figure 2 )

-la **fonction de production** permet de quantifier la part de la pluie précipitée (*pluie brute*) entrant réellement dans le réseau hydrographique après passage par le versant. Cette fonction nous donne donc en sortie une *pluie nette*. Elle doit rendre compte de deux phénomènes principaux : les pertes (par infiltration, interception ou évaporation) et la temporisation des écoulements (ruissellement de surface, écoulement hypodermique et écoulement de base).

-la **fonction de transfert** modélise le trajet de l'eau dans le réseau hydrographique. On entend par réseau hydrographique tout chemin préférentiel d'écoulement de l'eau. Lors du tracé de ce réseau pour la numérisation, nous l'avons donc prolongé à tous les talwegs déduits d'une inflexion, même minime, des courbes de niveau de la carte ETM au 1/50000.

La théorie du modèle porte sur la **fonction de transfert** dite H<sub>2</sub>U Hydrogramme Unitaire Universel ". Sa démonstration et sa justification sont détaillées par Duchesne et Cudennec (soumis) ; par Duchesne et Cudennec (1998) pour l'étape de description mathématique du réseau hydrographique ; et par Duchesne et Cudennec (1998) pour l'étape de déduction de l'hydrogramme unitaire.

La théorie aboutit à un certain stade à la description du bassin versant par la fonction de densité des différents points du bassin versant en fonction de leur chemin hydraulique. Cette fonction de densité s'exprime par l'équation suivante :

$$\rho(L) = \frac{dN_L}{N.dL} = \left( \frac{n}{2.\bar{L}} \right)^{\frac{n}{2}} \cdot \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot L^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{n.L}{2.\bar{L}}} \quad (1)$$

$L$  : est le chemin hydraulique,  $n$  : est l'ordre du bassin versant,  $\bar{L}$  : est le chemin hydraulique moyen du réseau hydrographique,  $\Gamma$  : symbolise la fonction gamma.

Cette fonction de densité est homogène à l'inverse d'une longueur et son intégrale selon  $L$  est égale à l'unité. Si l'on exprime la densité des points du bassin versant non plus en fonction du chemin hydraulique  $L$  mais en fonction du temps de parcours  $t$  de l'eau jusqu'à l'exutoire par le biais d'une vitesse moyenne d'écoulement  $V$ , on traduit la densité de bassins versants élémentaires contributifs de l'écoulement à l'exutoire en fonction du temps écoulé depuis l'averse.  $\rho(t) = \rho(L, \bar{V})$ . (02)

La densité ainsi exprimée en fonction du temps, c'est-à-dire la fonction de densité de probabilité des temps de parcours, est l'Hydrogramme Unitaire Universel  $u(t)$ .

$$u(t) = \rho(t) = \frac{n}{2.\bar{t}.\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \left( \frac{n.t}{2.\bar{t}} \right)^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{n.t}{2.\bar{t}}} \quad (3)$$

Pour appliquer H2U à une averse complexe, il faut, comme pour tout hydrogramme unitaire, calculer le produit de convolution suivant:

$$Q(t) = S \cdot \int i_{nette}(\tau) u(t - \tau) d\tau \quad (4)$$

$S$  est la superficie du bassin versant,  $u(t)$  est l'Hydrogramme Unitaire Universel H2U;  $i_{nette}$  est la pluie nette.

Dans la pratique la discrétisation de cette intégrale revient à effectuer les étapes suivantes:

- 1- Calcul de la pluie nette pour tout intervalle de temps à partir de la mesure, de la pluie brute et par application de la fonction de production.
- 2- Calcul de l'hydrogramme affine de l'hydrogramme unitaire pour chaque tranche de pluie nette ainsi obtenue, qui peut être considérée comme impulsionnelle si le pas de temps est suffisamment petit.
- 3- Construction de l'hydrogramme complexe selon le principe d'additivité.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

### Système d'information géographique pour l'extraction des données géomorphologiques de chaque bassin versant

Les données géomorphologiques des bassins sont extraites suivant le protocole mis au point par Cudennec (1999) sur le logiciel d'information géographique ERDAS IMAGINE de ESRI et la fonction de densité des longueurs des chemins hydrauliques et calculée à partir d'une grille de points quadra séparés par une distance de 10m. Cette fonction de densité est modélisée par l'ajustement d'une loi  $\Gamma$ . La figure 3 montre ce travail sur le bassin versant El Gouazine. La carte montre les chemins de l'eau extraits à partir de l'interprétation de la carte d'état major et numérisation par ERDAS. Le graphique sur cette même figure superpose la fonction de densité des chemins hydrauliques et sa modélisation par l'ajustement d'une loi gamma.

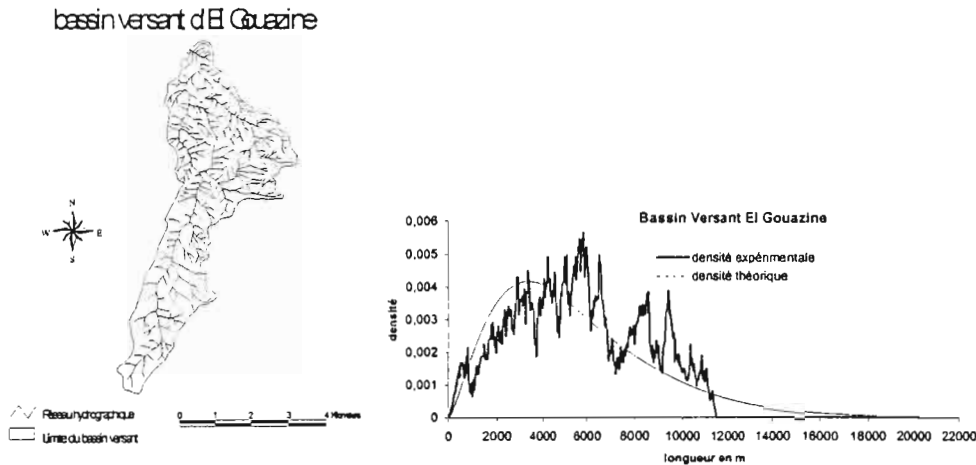


Fig. 3 : extraction de la fonction de répartition de densité des chemins hydrauliques.

### Fonction de production

Le hyétogramme des pluies mesurées est divisé en pas de temps de cinq minutes et est appelé hyétogramme de la pluie brute. Cette pluie est divisée en quatre parties par déconvolution :

1. La pluie d'imbibition correspond à la quantité de pluie qui est nécessaire à l'apparition d'un écoulement. Elle s'exprime en mm et est calculée par itération par tranche de 0.5 mm pour que l'hydrogramme H2U simulé commence de manière simultanée avec l'hydrogramme observé.
2. La pluie à retrancher à la pluie brute sur un critère d'intensité. Elle correspond à un seuil d'intensité en mm/h qu'il est nécessaire de dépasser pour observer un ruissellement. Ce seuil est constant pour tout le hyétogramme et varie peu d'un événement à l'autre. On l'appelle pluie interceptée par le bassin.
3. La pluie à retrancher à la pluie brute sur un critère de quantité. Un coefficient de ruissellement moyen est calculé après avoir retranché les deux pluies précédentes. On l'appelle pluie infiltrée.
4. La pluie nette est le hyétogramme résultant lorsque l'on a retranché les trois premières composantes de la pluie brute. La somme des pluies infiltrée et nette représente la pluie efficace.

Le seuil d'intensité et le coefficient de ruissellement sont optimisés en minimisant les écarts entre volume de crue calculé et volume de crue observé. La fonction de production est calibrée à partir de trois paramètres :  $P_i$  ou hauteur initiale de pluie à supprimer de la pluie brute,  $S$  ou seuil d'intensité et  $K$  coefficient de ruissellement. Les deux derniers coefficients sont optimisés sur le volume des crues observées. La figure 4 montre la déconvolution de la pluie du 20/09/1995 à Dékikéra.

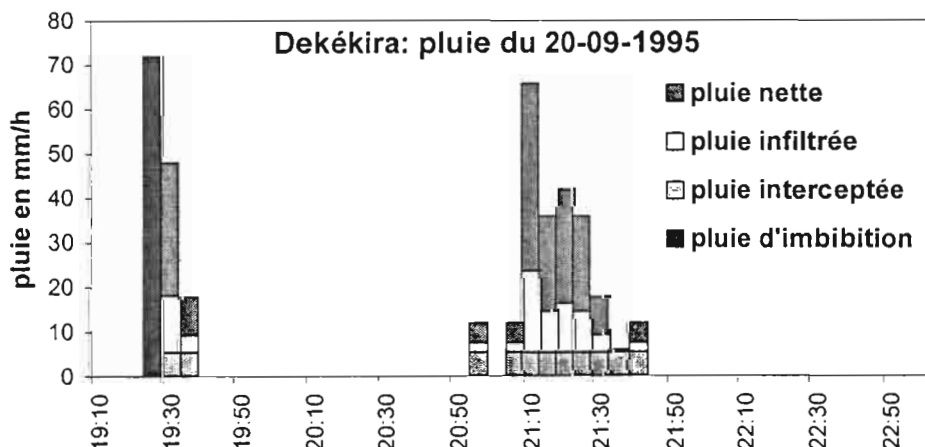


Fig. 4 : déconvolution de la pluie du 20/09/1995 à Dékikéra

Le tableau 4 donne les résultats statistiques de la déconvolution de la pluie brute.

Bassin versant de Dékekira : 24 événements				
	Pluie d'imbibition en mm	Pluie interceptée		K coefficient de ruissellement
		Seuil mm/h	Hauteur mm	
Moyenne	7,10	3,92	3,85	43,17
Médiane	7,50	3,78	2,42	47,00
Ecart type	4,00	2,98	4,71	17,84
Bassin versant de El Gouazine : 14 événements				
Moyenne	7,22	3,56	2,67	26,94
Médiane	8,00	3,96	1,85	19,50
Ecart type	4,16	1,81	1,97	19,69

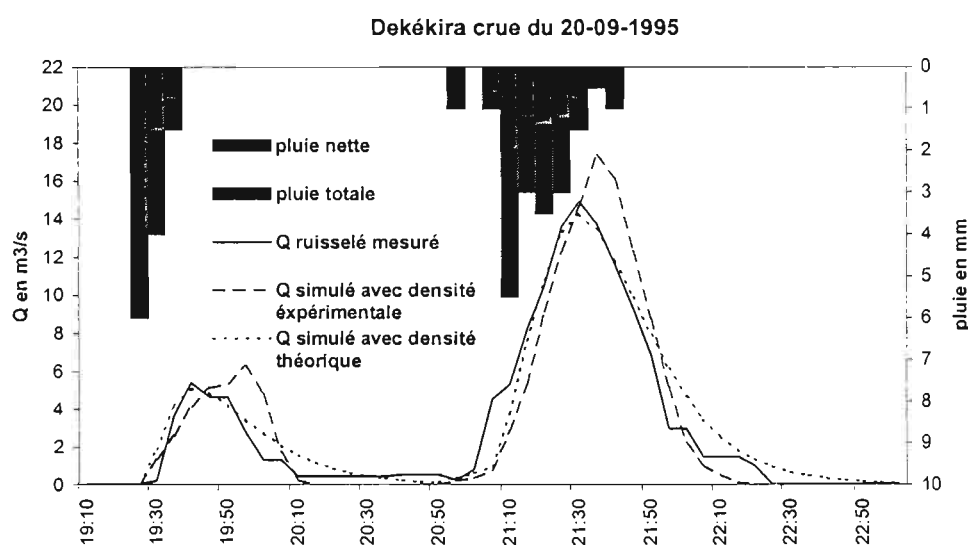
### Fonction de transfert

L'équation 3 de la fonction de transfert montre qu'il n'y a que deux paramètres :  $n$ , qui est l'ordre du bassin versant, facilement accessible à partir de la carte, et  $\bar{t}$ , qui est le temps de parcours de l'eau dans la longueur moyenne du bassin versant pour arriver à l'exutoire (caractéristique géomorphologique du bassin). Pratiquement, ce dernier paramètre est calculé par itération en prenant comme valeur de départ le temps de réponse du bassin (temps séparant le pic d'intensité du hyétogramme à la pointe de la crue) et en prenant comme critère d'optimisation le minimum de différence de débit de pointe. Le tableau 5 donne les valeurs statistiques pour le paramètre : temps de parcours de l'eau dans le chemin hydraulique moyen ( $\bar{t}$ ).

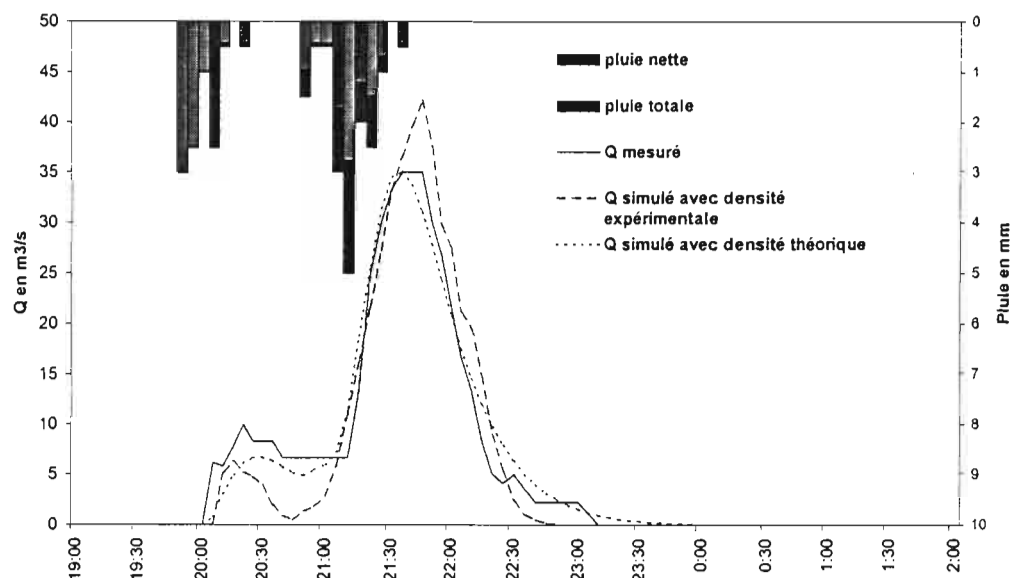
TABLEAU 5 : valeurs statistiques pour le paramètre  $\bar{t}$  (minutes)

	Bassin versant de Dékekira 24 événements, $\bar{L} = 1848\text{m}$ et $n=4$	Bassin versant de El Gouazine 14 événements, $\bar{L} = 5551\text{m}$ et $n=5$
Moyenne	21	33
Médiane	17	33
Ecart type	11	18

Les figures 5 et 6 montrent le résultats de la modélisation à Dékekira et El Gouazine pour l'événement du 20/9/95 en utilisant la fonction de densité des longueurs de réseaux expérimentale ou modélisée par une loi  $\Gamma$ .



El Gouazine crue du 20-09-1995



### Simulation des crues exceptionnelles

On a construit des hyétoigrammes types pour des averses de récurrence donnée en faisant l'hypothèse que l'averse correspondante a la hauteur de la pluie journalière et le pic d'intensité maximale en cinq minutes de même récurrence. On lui donne la forme des averses de type orageux lors d'un déplacement frontal d'une dépression. Le hyétoigramme comprend une ondée préliminaire de faible intensité et est de courte durée. Cette ondée est suivie par le pic d'intensité maximale puis par une longue traîne avec des intensités décroissantes. (figure 7 et tableau 6)

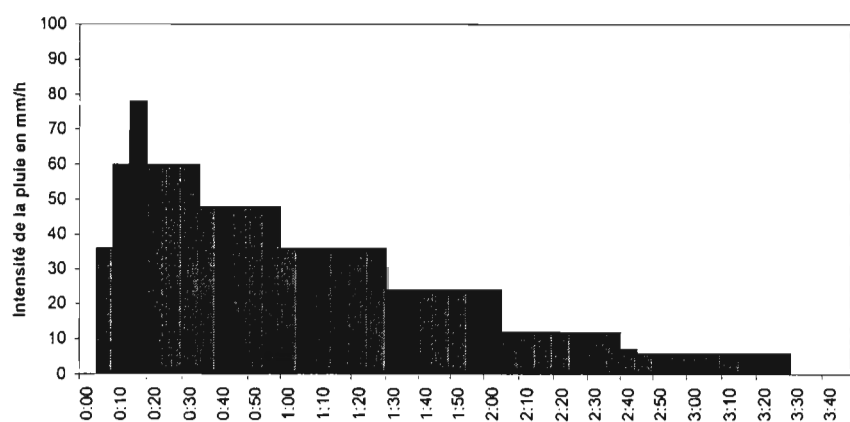


Fig. 7 : Exemple de l'hyétoigramme décennal

TABEAU 6 : Pluie cumulée en mm

Durée en mn	5	10	15	30	45	60	90	120	180	240
5 ans	2,0	5,5	9,0	20,1	29,6	38,1	51,6	62,1	74,6	78,0
10 ans	3,0	8,0	14,5	29,5	41,5	52,5	69,5	81,5	91,1	93,6
20 ans	8,5	25,0	61,0	79,0	89,0	101,0	106,5	109,6		
50 ans	8,0	33,0	81,0	105,0	116,0	127,0	130,5	131,3		

On réalise la simulation des crues en prenant les valeurs moyennes des paramètres de calage (trois pour la production et un pour le transfert). Les figures 8 et 9 montrent les simulations pour les crues d'occurrence 2,5,10,20 et 50. Le tableau 7 récapitule les valeurs caractérisant les crues exceptionnelles.

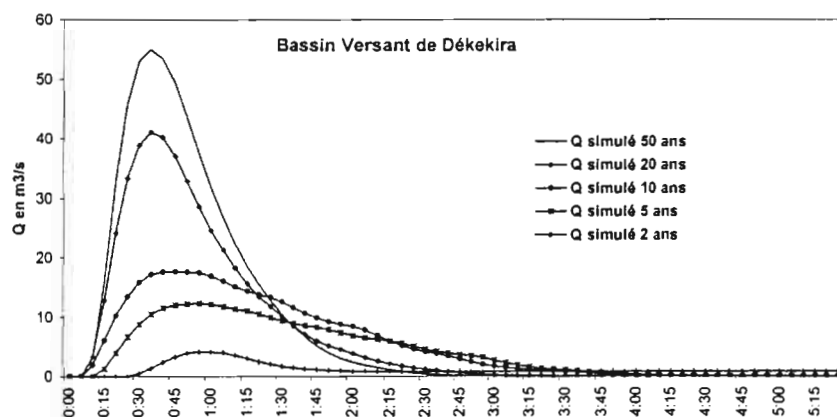


Fig. 8 : Prédétermination des crues exceptionnelles à Dékékéra

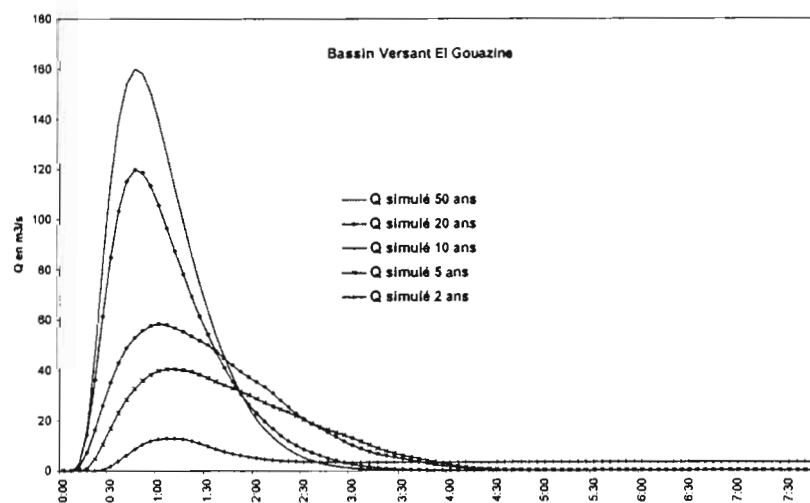


Fig. 9 : prédétermination des crues exceptionnelles à El Gouazine

TABEAU 7 : Crues exceptionnelles sur les bassins étudiés

Bassin versant Dékékira

	Volume m3	Débit de pointe m3/s	Q max déversé	Q max déversoir	Tm en mn	Tb en mn
Crue rec 0,2	81 250	12,32	0	90	50	205
Crue rec 0,1	106 580	17,68	0	90	40	170
Crue rec 0,05	137 500	41,03	0	90	30	110
Crue rec. 0,02	169 299	54,98	0	90	30	100

Bassin versant El Gouazine

Crue rec 0,2	295 234	40,56	20,45	90	55	220
Crue rec 0,1	385 251	58,59	44,92	90	50	190
Crue rec 0,05	493 698	119,86	105,53	90	40	155
Crue rec. 0,02	606 175	160,11	158,35	90	35	125

En considérant que les paramètres de calage obtenus crue par crue ont une distribution normale, il est possible de calculer un intervalle de confiance pour l'estimation des paramètres de la crue exceptionnelle

estimée. Le tableau 8 donne les intervalles de confiance à 90 % pour l'estimation des caractéristiques des crues décennales pour les deux bassins étudiés.

TABLEAU 8 : Intervalles de confiance (90%) de l'estimation de la crue décennale

Bassin versant	Qmax en m <sup>3</sup> /s	Volume 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	Temps de montée min	Temps de base min
Dékékira	[14.1; 23]	[87.3;123.6]	[55;30]	[240;200]
El Gouazine	[32.5; 51]	[97.3;191.2]	[85;35]	[330;240]

## CONCLUSIONS

Ce modèle simple à mettre en œuvre a permis de prédéterminer des crues exceptionnelles pouvant survenir dans un petit bassin versant de lac collinaire. La prédétermination des crues se fait après l'analyse statistique d'événements pluvieux et la connaissance de la morphologie du bassin versant.

La fonction de production par déconvolution du hyétogramme de la pluie brute peut paraître simpliste. Elle est adaptée à un calage crue par crue du modèle dans un objectif de simulation avec des valeurs moyennes. L'hypothèse de base de cette application, courante en hydrologie opérationnelle, est que la crue d'une occurrence donnée est produite par l'averse de même occurrence toutes les autres conditions de ruissellement étant moyennes.

La fonction de transfert, plus élaborée, repose sur le temps de parcours des chemins hydrauliques. Elle permet une bonne simulation de la forme de la crue et de sa pointe, paramètres de première importance pour le dimensionnement des évacuateurs de crues pour des petits barrages en terre compactée. Dans l'application du modèle, nous avons trouvé peu de différence entre les simulations utilisant la fonction de répartition expérimentale des densités des chemins hydrauliques ou sa représentation par une loi gamma à deux paramètres qui sont la longueur moyenne du réseau hydrographique et l'ordre du cours d'eau à l'exutoire considéré suivant la classification de Strahler. Ces deux valeurs sont faciles à déterminer à partir de la carte d'état major du bassin versant.

Une majorité des bassins avec des lacs collinaires font l'objet de travaux de conservation des eaux et des sols pour tenter de limiter l'envasement des barrages. L'aménagement le plus courant consiste en l'édification de banquettes en terre isohypses sur les versants. Un tel aménagement peut être représenté dans ce modèle par une augmentation de la pluie d'imbibition du bassin et par un allongement de la longueur moyenne des chemins hydrauliques. Des essais concluants ont été réalisés sur les deux bassins présentés aménagés en partie depuis 1997. Les recherches en cours tentent de représenter l'impact des aménagements en banquettes anti érosives par la modification qu'il faut apporter aux paramètres de ce modèle.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J. & REJEB N. (1997) : Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. CR. Acad. Agric. Fr., 1997, pp. 77-88. Séance du 19 Mars 1997. Note présentée par J. ALBERGEL. Discussion pp. 101-104.
- BAILLY C., CORBIERRE V., DUCHESNE J. and LABAQUERE H., 1996. Real-time decision aid-for storm water treatment. Hydroinformatics'96, Proceedings of the second international conference on hydroinformatics, Zurich, Suisse, 9-13 sept. 1996, 245-250.
- BENZARTI Z., 1995. La maîtrise des eaux de surface : l'expérience des lacs collinaires en Tunisie. D.G.R.E. Tunis.
- CHOW V.T., 1964. Handbook of applied hydrology - a compendium of water-resources technology. McGRAW-HILL, New York, Etats Unis, 1418 p.
- CUDENNEC C., DUCHESNE J. 1997. Le modèle H2U, état de l'art : une modélisation déterministe de la transformation de la pluie en débit. Rapport interne, Laboratoire de physique des surfaces naturelles et de génie rural ENSA de Rennes, 35p.
- DCES / IRD (1996 à 2000) Annuaire Hydrologiques des lacs collinaires de Tunisie.
- DUCHESNE J. et CUDENNEC C., 1998. H2U une fonction de transfert pluie-débit déterministe et polyvalente; vers des applications multiples. Congrès de la société hydrotechnique de France «L'école française de l'eau au service du développement mondial », Chambéry, 15-17 septembre 1998.
- DUCHESNE J. et CUDENNEC C., soumis, Prédiction d'une loi universelle de morphologie des paysages par combinaison de l'invariance d'échelle et de la physique statistique.

- DUCHESNE J., CUDENNEC C. and CORBIERRE V., 1997. Relevance of the H2U model to predict the discharge of a catchment. Watermatex 97, Proceedings of the fourth international symposium on system analysis and computing in water quality management, Québec, Canada, 17-20 juin 1997, 265-272.
- DUCHESNE J., CUDENNEC C. and CORBIERRE V., 1997. Relevance of the H2U model to predict the discharge of a catchment. Water Science and Technology.
- GRESILLON J.M. et NEYRET-GIGOT J.M., 1993. Storhy: un modèle de prévision fondé sur la séparation entre écoulement de versants et propagation dans le réseau hydrographique. Hydrol. Continent., vol. 8, n01, 35-50.
- LLAMAS J., 1993. Hydrologie générale - Principes et applications. GAETAN MORIN EDITEUR, Boucherville, Québec, Canada, 527 p.
- Ministère de l'agriculture Tunisie, 1993. Stratégie Nationale de la Conservation des Eaux et du Sol 1990-2000. Copie revue et modifiée.
- NASRI S., ALBERGEL J., SMAOUI M., HABAÏEB H. (1997) : Hydrologie des lacs collinaires en Tunisie. Les Journées Scientifiques de l'INGREF : Collecte, stockage et valorisation des eaux de ruissellement en agriculture pluviale. IRESA, SERST, UE, CIHEAM, ORSTOM, GTZ. Monastir, 25-27 Mars 1997.
- RODRIGUEZ-ITURBE I., VALDES J.B., 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response. Water Resources Research, 15(6), 1409-1420.





# INVESTIGATION HYDRO-CHIMIQUE DES SYSTEMES KARSTIQUES NORD-MONTPELLIERAINS. MODELISATION INVERSE DES RELATIONS PLUIE-DEBIT ET DES VARIATIONS TEMPORELLES DES CONCENTRATIONS.

Pinault J.L.\* , Ladouche B.\* , Petit V.\* , Doerfliger N.\* , Bakalowicz M.\*\*

\* BRGM, service EAU, BP6009, 45060 Orléans Cedex 2, France

\*\* ISTEEM, Hydrosiences, CNRS-UM II, C.C.057, 34095 Montpellier Cedex 5, France

Deux études destinées à caractériser la ressource en eau de systèmes karstiques nord-montpellerains sont proposées. Elles font l'objet d'une convention entre le BRGM et le Conseil Général de l'Hérault et portent sur :

- la résurgence des Cent Fonts, située en rive droite de l'Hérault sur la commune de Causse-de-la-Selle. Elle est l'exutoire principal du massif du Causse de la Selle, qui est situé entre les rivières de la Buèges et de l'Hérault. La source des Cent Fonts, dont la surface d'alimentation est 45 km<sup>2</sup>, n'est pas captée actuellement.
- la résurgence des Fontanilles, située en rive gauche de l'Hérault sur la commune de Puéchabon. Elle est l'un des exutoires majeurs du Causse de Viols-le-Fort au nord de Montpellier. Ce système karstique, bien que très proche du massif drainé par la source des Cent Fonts en est totalement indépendant. En effet, le cours de l'Hérault, représentant le niveau de base des écoulements souterrains, sert de limite entre ces 2 unités karstiques. La source des Fontanilles, dont la surface d'alimentation est 18 km<sup>2</sup>, est déjà captée au niveau de l'émergence et exploitée à un débit de 150m<sup>3</sup>/j en été et 80m<sup>3</sup>/j en hiver pour l'alimentation en eau potable de la commune de Puéchabon.
- L'une et l'autre de ces sources a été instrumentée de manière à suivre le débit ainsi que les paramètres physico-chimiques à l'émergence. Un échantillonnage hebdomadaire au cours du premier cycle hydrologique, puis mensuel au cours du second a permis le suivi des éléments majeurs.

Ces études sont destinées en particulier à la compréhension des mécanismes de transfert, ces investigations étant grandement facilitées lorsqu'une discrimination est faite entre l'eau transférée par effet de chasse, l'eau événementielle, intervenant dans l'infiltration rapide et différée, dont l'origine peut être reliée à une pluie particulière (eau 'jeune'), et l'eau pré-événementielle, provenant de la vidange du réservoir constitué par la zone noyée, qui ne peut être reliée à aucun événement pluvieux particulier (eau 'ancienne').

Le propos de cette communication est l'utilisation d'une technique de séparation des hydrogrammes que nous avons développée récemment (Pinault *et al.*, 2001). Cette méthode repose sur l'analyse des processus linéaires et non-linéaires (effet de chasse) et sur la reconstruction de la composante linéaire de l'hydrogramme unitaire à partir d'une combinaison des fonctions de transfert des flux Ca et Mg représentant respectivement la composante événementielle et pré-événementielle. Les processus de dissolution du Ca, qui résultent des échanges entre la calcite et l'eau de pluie chargée en CO<sub>2</sub> stockée dans l'épikarst, est rapide (quelques jours à quelques semaines) alors que le magnésium qui provient de la dolomie située à la base de la formation a une cinétique de dissolution plus lente (plusieurs mois pour atteindre l'équilibre). Le calcium peut donc être considéré comme traceur événementiel, c'est à dire le marqueur des eaux d'infiltration, alors que le magnésium marque l'eau du réservoir constitué par la zone noyée. La technique de modélisation inverse utilisée permet de reconstruire l'hydrogramme unitaire à partir des réponses impulsionnelles des flux de Ca et Mg, ces réponses impulsionnelles étant utilisées dans leur intégralité, ce qui confère à cette technique de décomposition de l'hydrogramme tant son originalité que sa robustesse.

## SOURCE DES CENT FONTS

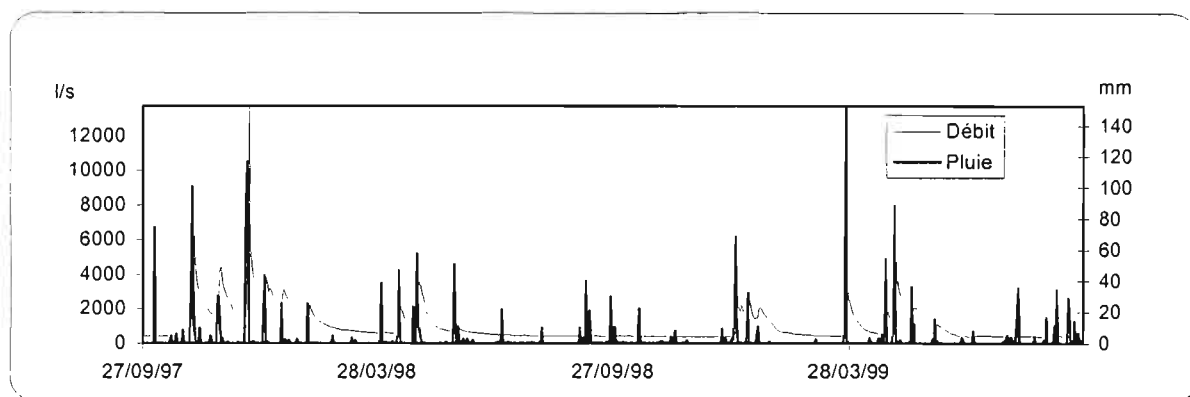


Fig. 1 : Représentation du débit et de la pluie à St Martin de Londres

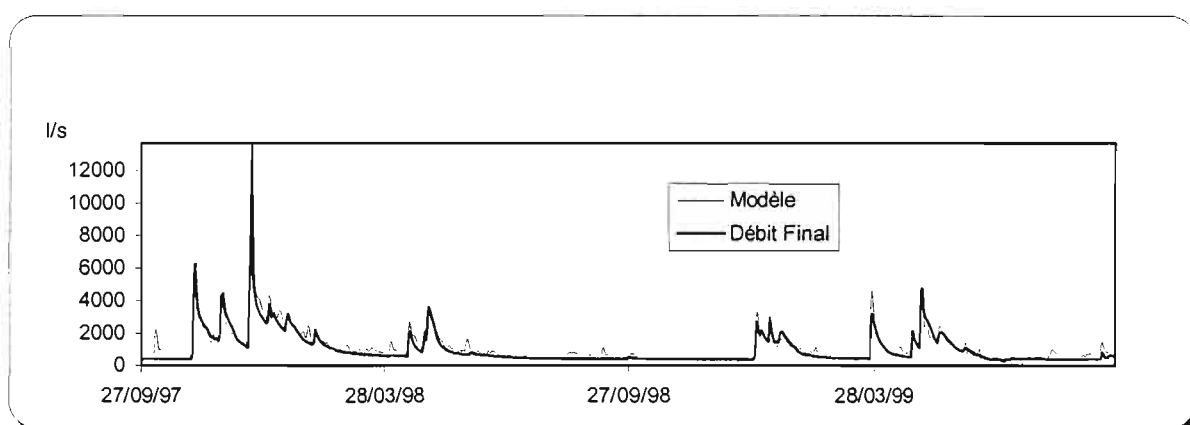


Fig. 2 : Comparaison du modèle aux observations: écart-type=320 l/s ( 95 % de la variance expliquée)

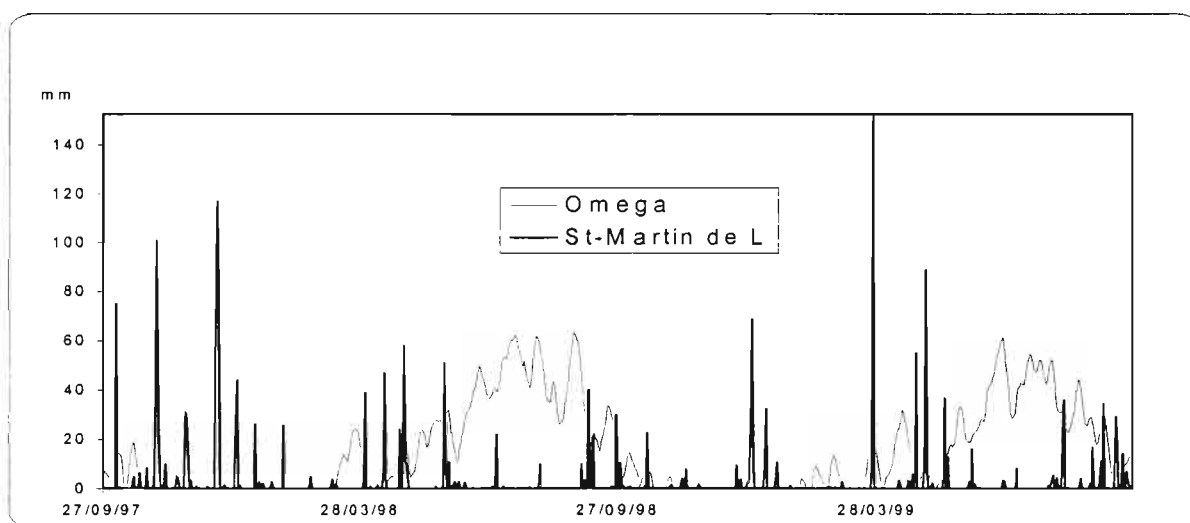


Fig. 3 : Seuil de pluie efficace: Oméga

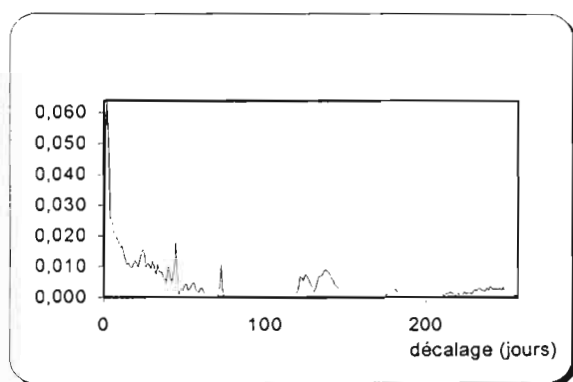


Fig. 4 : Hydrogramme unitaire

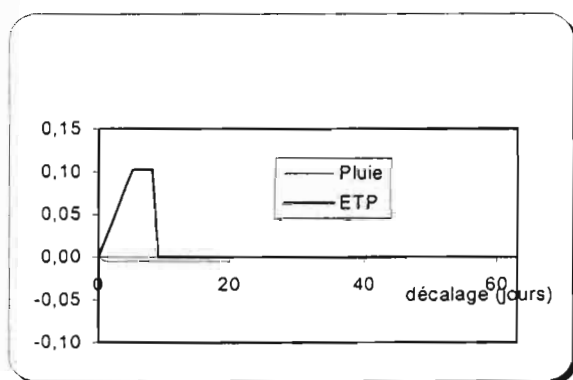


Fig. 5 : Réponse impulsionnelle de Omega à la pluie et à l'ETP

#### Calcul de l'hydrogramme unitaire :

La technique d'inversion consiste à calculer l'hydrogramme unitaire (Fig. 4) et le seuil Oméga de pluie efficace (Fig. 3) de telle sorte que le modèle soit le plus proche possible du débit observé (Fig. 2). Ce seuil Oméga est estimé à partir de la pluie et de l'ETP de telle sorte que seule la hauteur de pluie située au-dessus de ce seuil génère un débit à l'exutoire. Ce seuil, exprimé en mm de pluie, représente donc la reconstitution des réserves, suite à l'évapotranspiration. Il est calculé à partir d'une réponse impulsionnelle à la pluie et à l'ETP (Fig. 5) également obtenue par inversion.

#### Calcul de la réponse impulsionnelle du flux de calcium :

La concentration du calcium dans la source (Fig. 6) suggère que le calcium peut être utilisé en tant que traceur de l'eau événementielle car sa concentration augmente avec le débit. La concentration de Ca dans le réservoir constitué par la zone noyée, obtenue en période d'étiage, est voisine de 68 mg/L. Cette concentration est inférieure à celle de l'eau stockée dans l'epikarst, suite aux processus de précipitation s'établissant dans la zone noyée, alors que les processus de dissolution de la calcite en milieu diphasique sont très actifs dans la zone d'infiltration.

La technique d'inversion consiste à calculer la fonction de transfert du flux de calcium différentiel (produit du débit par la concentration de Ca exprimée par rapport à la concentration dans le réservoir), ce qui suppose une estimation de la concentration présumée de Ca dans l'epikarst (Fig. 7). Cette concentration, représentée par une série trigonométrique dans le modèle inverse, est soumise à une forte variabilité suite à la dilution de l'eau stockée dans l'epikarst à la fin de la période hivernale.

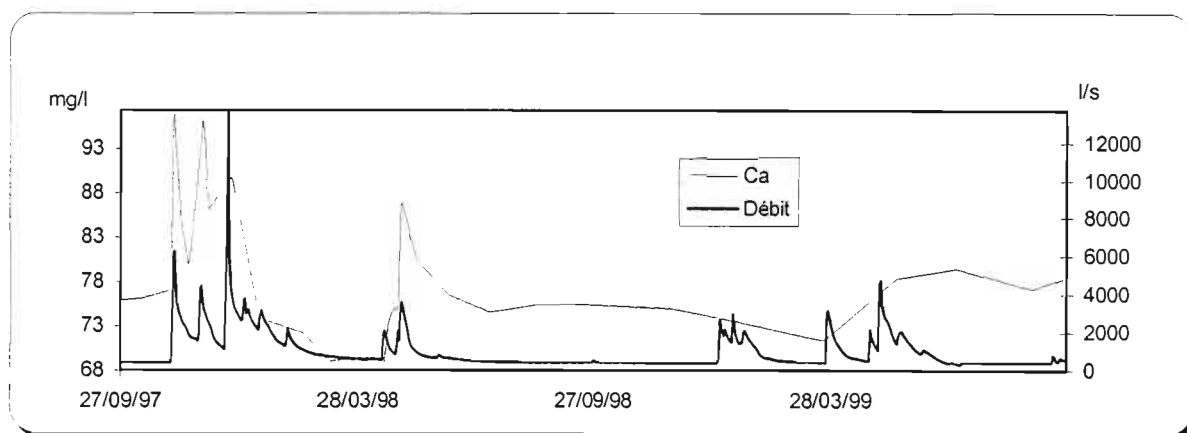


Fig. 6 : Concentration de Ca dans la source

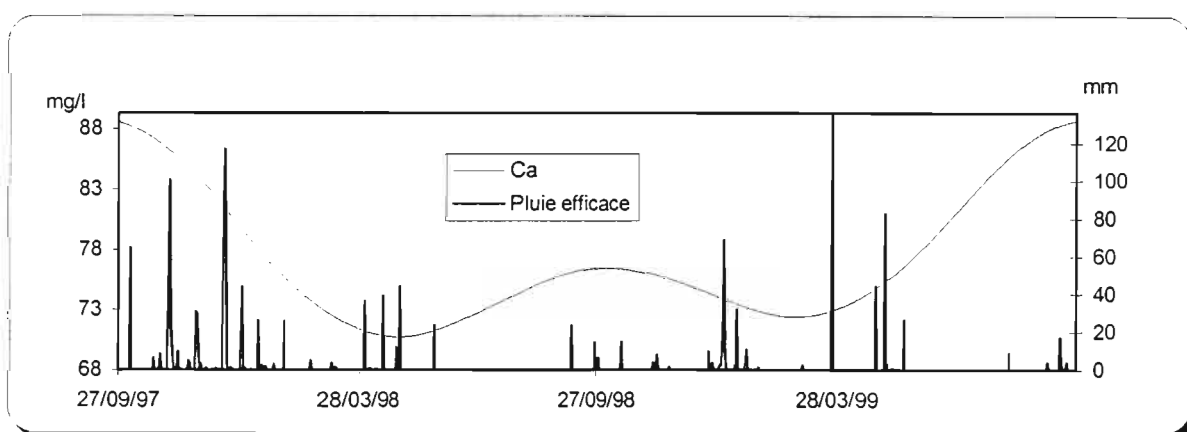


Fig. :7 Concentration calculée de Ca de l'eau stockée dans l'epikarst et pluie efficace

#### **Calcul de la réponse impulsionnelle du flux de magnésium :**

Le magnésium dont la concentration mesurée dans la source (Fig. 8) diminue lorsque le débit augmente, est utilisé comme traceur pré-événementiel.

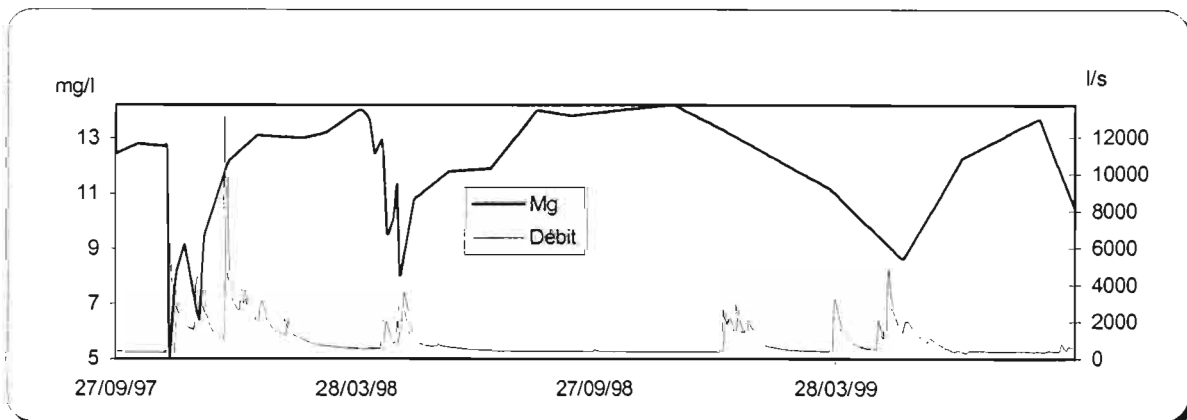


Fig. 8 : Concentration de Mg dans la source

De la même manière que pour le calcium, le calcul de la fonction de transfert du flux de magnésium nécessite l'estimation de la concentration de Mg dans le réservoir (Fig. 9), celle-ci étant représentée par une série trigonométrique dans le modèle inverse.

La concentration subit une faible variabilité consécutive aux processus de dilution observés au printemps. Le temps de régulation du réservoir, qui est de plusieurs mois, reflète un effet tampon important.

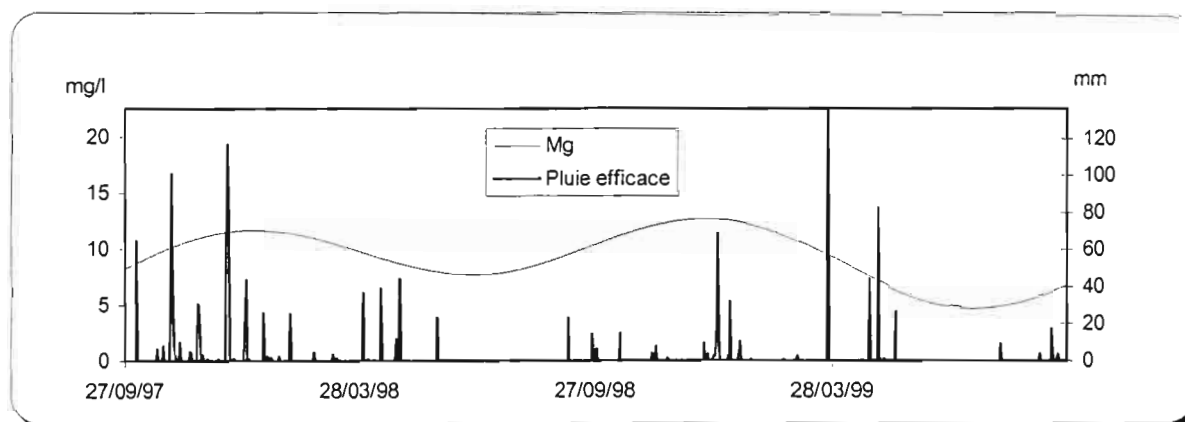


Fig. 9 : Concentration calculée de Mg dans l'eau de la zone noyée et pluie efficace

### Reconstruction de l'hydrogramme unitaire à partir des R.I. des flux de Ca et Mg.

La reconstruction de l'hydrogramme unitaire à partir des deux composantes valide *à posteriori* le modèle postulant que Ca et Mg sont respectivement les traceurs de l'eau événementielle et pré-événementielle. Si cette hypothèse avait été mise en défaut, la reconstruction de l'hydrogramme unitaire à partir des deux composantes de flux n'aurait pas été possible sur toute la durée des RI, ce qui se produit lorsque les processus de dissolution marquant l'eau événementielle ne sont pas suffisamment rapides vis à vis du temps de régulation de l'hydrosystème : dans ce cas, la somme des 2 composantes de flux sous estime l'hydrogramme unitaire pendant la durée du processus de dissolution, c'est à dire pour les faibles décalages.

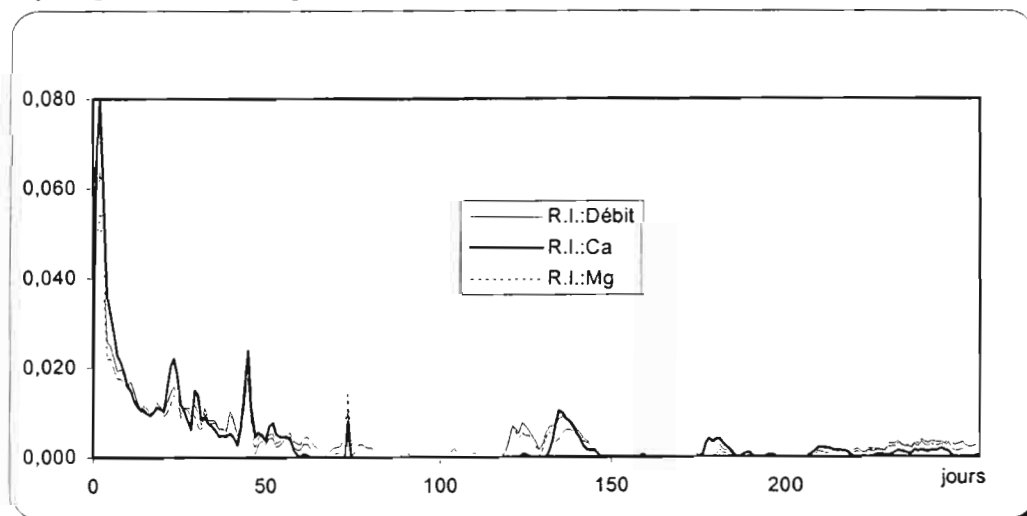


Fig. 10 : Réponse impulsionnelle du débit, événementielle (Ca) et pré-événementielle (Mg)

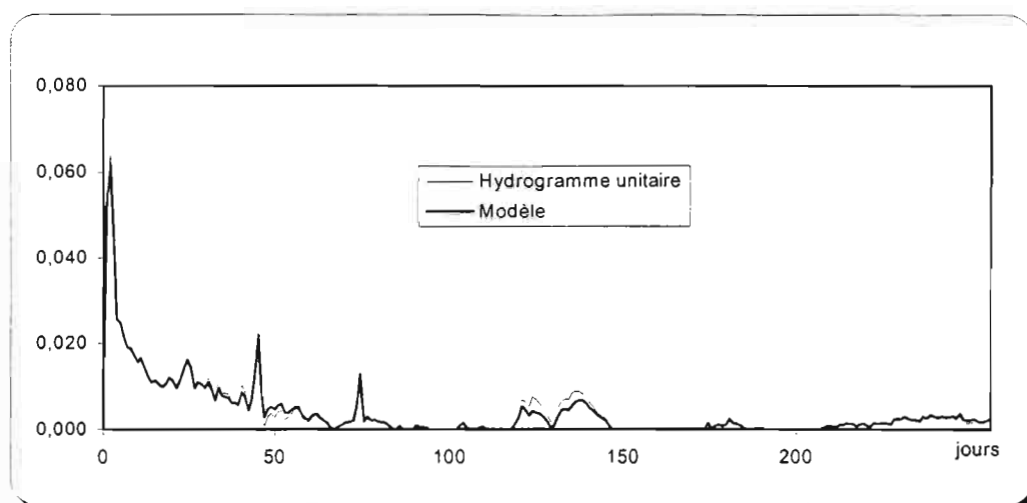


Fig. 11 : Hydrogramme unitaire reconstruit à partir des R.I. Ca et Mg

Le poids des 2 composantes événementielle et pré-événementielle est respectivement de 35 et 65%. Ces poids représentent la contribution moyenne des deux modes de transfert. Ils montrent que l'essentiel du débit de la source des Cent Fonts résulte de la vidange du réservoir, l'eau d'infiltration ne représentant que 35 % du débit (Fig. 12).

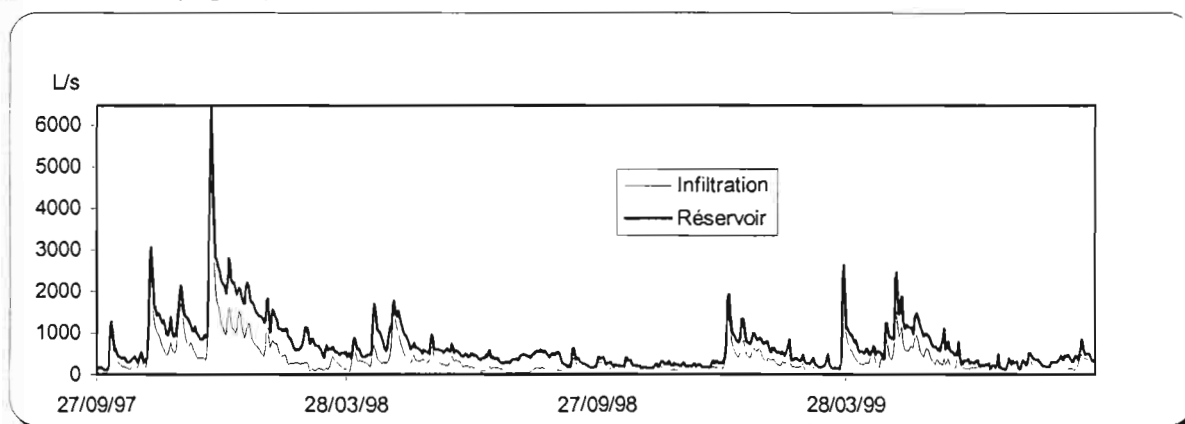


Fig. 12 : Les différentes composantes de l'hydrogramme: 35 % d'eau d'infiltration et 65 % d'eau du réservoir

### Source des Fontanilles

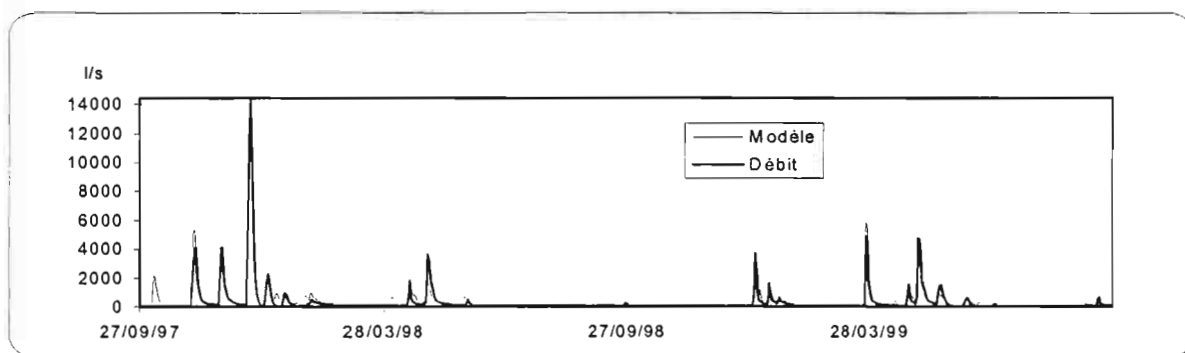


Fig. 13 : Comparaison du modèle aux observations: écart-type=330 l/s (94 % de la variance expliquée)

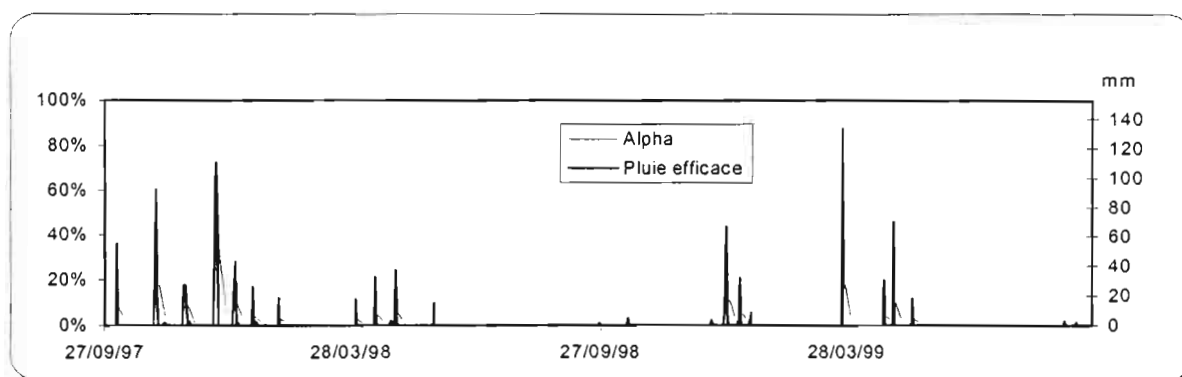


Fig. 14 : Contribution de la pluie efficace à la composante non linéaire : Alpha

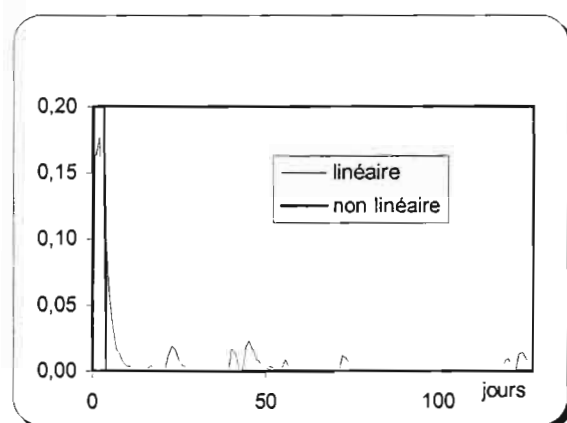


Fig. 15 : Composante linéaire et non linéaire de l'hydrogramme unitaire

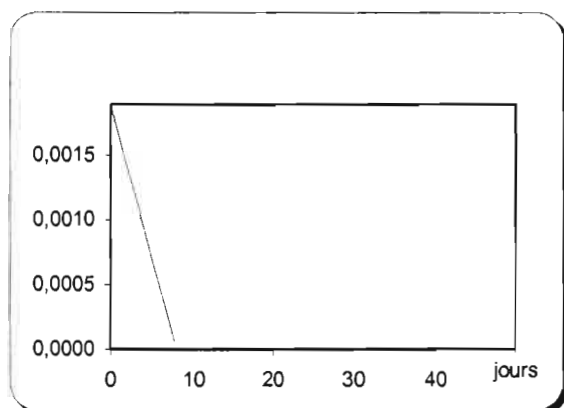


Fig. 16 : Réponse impulsionnelle de Alpha à la pluie efficace

### Calcul de l'hydrogramme unitaire :

La technique d'inversion fait apparaître une forte non-linéarité du karst des Fontanilles, due à l'effet de chasse qui se produit en présence de pluies efficaces importantes. La contribution de la pluie efficace à cet effet de chasse est représentée par la fonction Alpha (Fig. 14) dont la réponse impulsionnelle à la pluie efficace, calculée également par inversion, est représentée sur la figure 16.

Cette réponse impulsionnelle est très courte, ce qui signifie que le caractère non-linéaire du karst est très éphémère et disparaît quelques jours seulement après l'événement pluie qui l'a généré. La composante non linéaire de l'hydrogramme unitaire, ou fonction de transfert de l'effet de chasse, est également très courte (Figure 15) : elle représente l'augmentation du débit de la source, suite au transfert de pression induit par la connexion hydraulique établie entre la zone d'infiltration et la zone noyée.



## MODELISATION DU FLUX DE CALCIUM

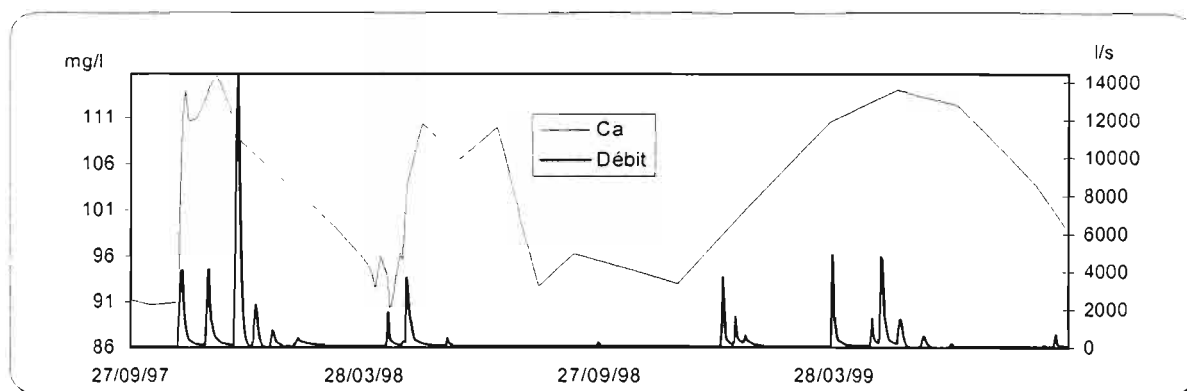


Fig. 17 : Concentration de Ca dans la source

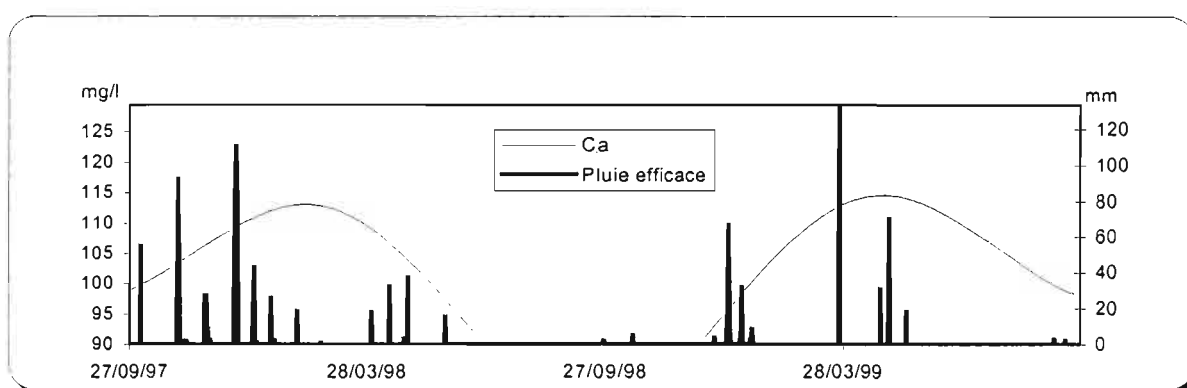


Fig. 18 : Concentration calculée de Ca dans l'epikarst et pluie efficace

Là encore, la montée de Ca consécutive à celle du débit suggère que le calcium est un traceur événementiel de l'hydrosystème. La concentration de Ca dans le réservoir constitué par la zone noyée, obtenue en période d'été, est voisine de 90 mg/L, concentration très supérieure à ce qui est observé dans la source des Cent Fonts (68 mg/L). La concentration calculée de Ca dans l'epikarst manifeste une variabilité importante (Fig. 18).

## MODELISATION DU FLUX DE MAGNESIUM

La diminution de Mg observée dans la source lorsque le débit augmente invite là encore à considérer le magnésium comme traceur pré-événementiel (Fig. 19) du système karstique.

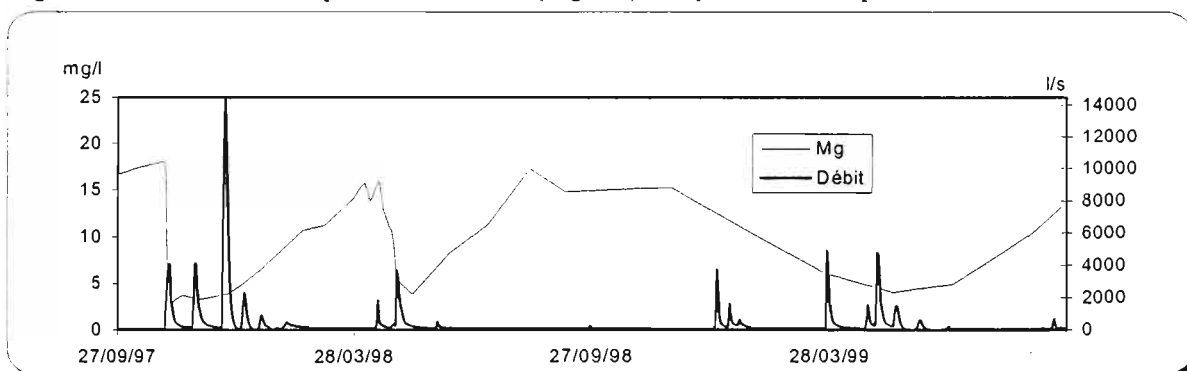


Fig. 19 : Concentration de Mg dans la source

### Reconstruction de l'hydrogramme unitaire à partir des R.I. des flux de Ca et Mg.

Là encore, la reconstruction de l'hydrogramme unitaire à partir des deux composantes valide *a posteriori* le modèle postulant que Ca et Mg sont respectivement les traceurs de l'eau événementielle et pré-événementielle (Fig. 20 et 21).

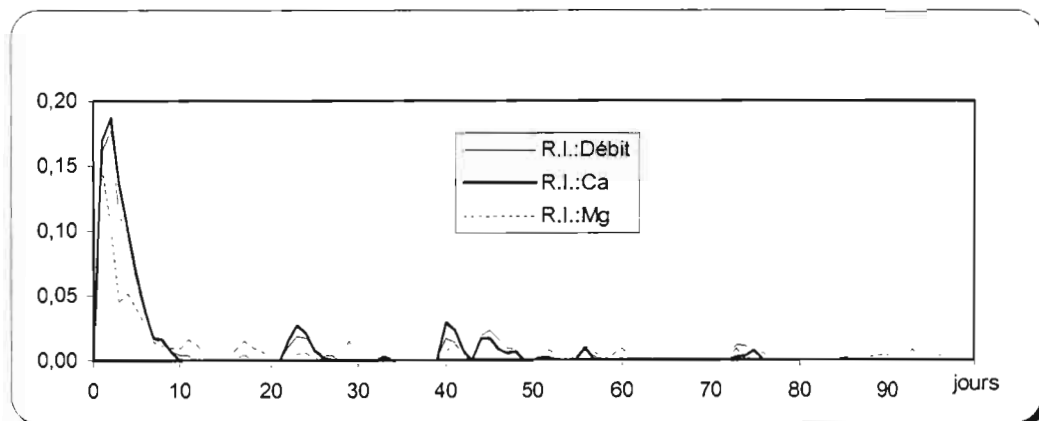


Fig. 20 : Réponse impulsionnelle du débit, événementielle (Ca) et pré-événementielle (Mg)

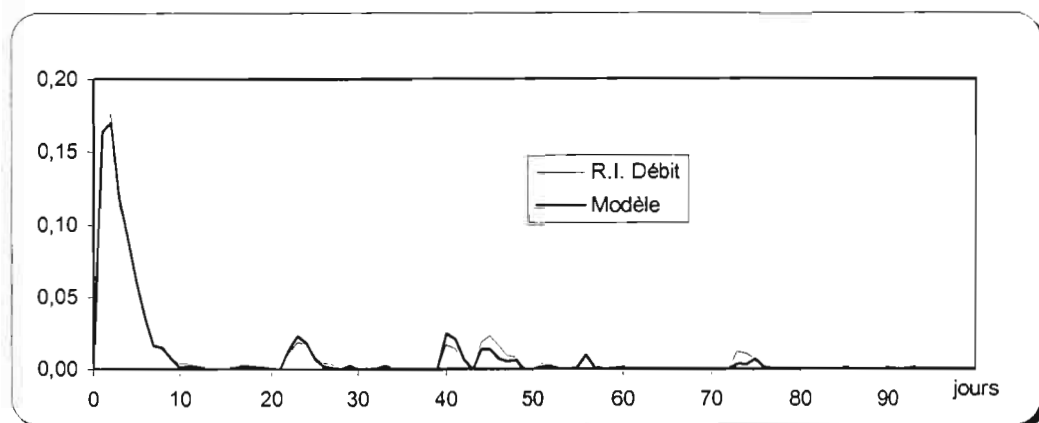


Fig. 21 : Hydrogramme unitaire reconstruit à partir des R.I. Ca et Mg

### Reconstruction de l'hydrogramme à partir des flux de Ca et Mg.

Les poids des 3 composantes non-linéaire, événementielle et pré-événementielle sont respectivement de 17, 69 et 14 %. Ces poids représentent la contribution moyenne des trois modes de transfert. Ils montrent que l'essentiel du débit de la source des Fontanilles résulte de l'infiltration rapide et différée de quelques jours, l'eau de la zone noyée ne représentant que 14 % du débit (Fig. 22). Le transfert non linéaire, qui était absent à la source des Cent Fonts représente maintenant 17 % du débit, ce qui peut représenter l'essentiel du débit instantané, étant donné le caractère très éphémère du phénomène (Fig. 22).

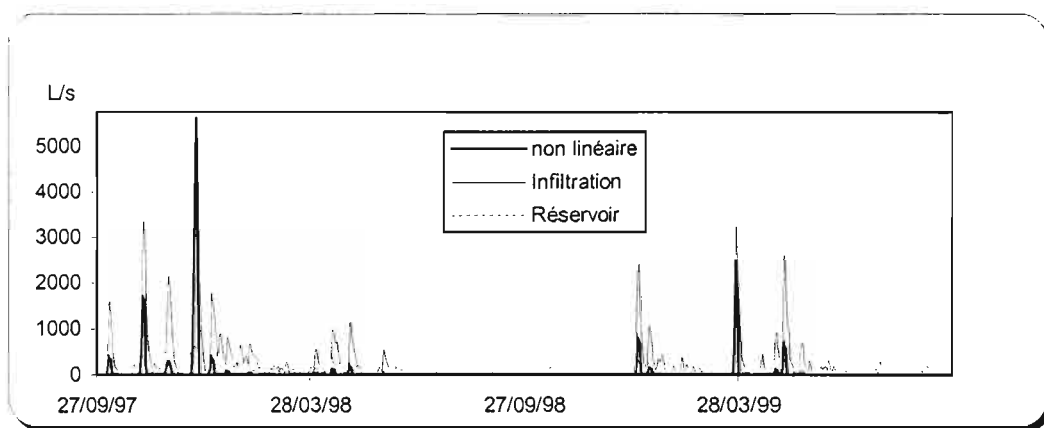


Fig. 22 : Les différentes composantes de l'hydrogramme: 17 % de transfert non linéaire, 69 % d'eau d'infiltration, 14 % d'eau du réservoir

## CONCLUSION :

L'étude comparative de ces 2 karsts montre des différences considérables au niveau de leur fonctionnement, probablement en raison de leur degré d'évolution très différent.

La source des Cent Fonts, qui est alimentée par la Buèges, est régie par un régime d'écoulement linéaire, avec un réservoir très important (hydrogramme = 35% d'eau d'infiltration, 65% d'eau du réservoir), alors que la source des Fontanilles (karst unaire) montre un régime d'écoulement fortement non-linéaire (effet de chasse), la contribution de l'eau du réservoir étant très faible.

Ces caractéristiques, qui sont confirmées par d'autres études menées en parallèle (traçage, utilisation d'un modèle global) seront essentielles lors de la planification de l'exploitation de la ressource.

## RÉFÉRENCES :

- PINAULT J-L, H. PAUWELS, Ch. CANN, Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems – application to nitrate transport and denitrification, *Water Res. Research*, à paraître
- J-L PINAULT, V. PLAGNES and L. AQUILINA, M. BAKALOWICZ, Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems - Characterization of karst system functioning, *Water Res. Research*, à paraître

# HYDROMED MODEL AND ITS APPLICATION ON SEMI-ARID MEDITERRANEAN CATCHMENTS WITH HILL RESERVOIRS

## 1- THE RAINFALL-RUNOFF MODEL

Ragab R.

*Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, OX10, 8 BB, UK*

*E-mail: Rag@ceh.ac.uk*

### ABSTRACT

The semi-arid region of the Mediterranean basin has specific climatic conditions associated mainly with very erratic pattern of rainfall with respect to time, duration, intensity and amount. Given the fact that, the hydrology of semi-arid is different from humid and sub-humid regions, one would expect that models developed for humid regions are not necessarily applicable to other climatic regions.

Mediterranean countries could make a better use of their water resources by constructing small hill reservoirs. Gaining more understanding of the dominant hydrological processes operating in such environment will help in construction as well as in sustainable water use of these reservoirs. Conducting field observations and modelling studies can achieve these goals. After being validated, models can be used as a management tool. The HYDROMED model has been developed as part of the HYDROMED project specifically for the Mediterranean basin conditions. The model has two sub-models, the Rainfall-Runoff (part 1 of this paper) and Reservoir storage capacity and probability of failure (part 2 of this paper). In part 1, the hydrological processes contributing to the runoff are described and their mathematical formulation are given. In part 2 the model deals with the storage capacity of a reservoir required to maintaining a yield with a given probability of failure. The HYDROMED model is a menu driven, easy and friendly to use and runs under Windows 95 operation system. The model uses the Genetic Algorithm for Optimization and has default values that could be selected in absence of measured parameter values. The model has different options to calculate the flows and options for the time steps ranging from less than one hour to one month. The model has facility to import data from data loggers and output results into data files and graphs. An example of calibration for El-Guazine catchment has been given. The model showed successfully its ability to simulate the Rainfall-Runoff event. More results on different catchments will be published in a follow up papers.

### KEYWORDS

HYDROMED, Rainfall-Runoff model, Mediterranean, Conceptual model

### INTRODUCTION

It is widely accepted that many Mediterranean countries could make better use of their water resources by constructing small hill reservoirs. Indeed countries such as Tunisia are known world wide for their water harvesting techniques, have a large number of small dams, with many more planned for the years to come (Prinz, 1995). The proposal in Tunisia is to build a thousand hill reservoirs by the end of this year. Gomer (1996) presented research carried out on similar catchments in Algeria. A very broad view of integrated rural water management throughout the world is presented by FAO (1993). A study of a Mediterranean hill reservoir in Greece is presented in a paper by Ghini and Tsoumanis (1995). Of the various types of surface runoff models available to hydrologists, the physically-based models where parameters in the model are determined by measurable features of the catchment need more data and usually only requires moderate calibration. The conceptual model, where some of the parameters may be loosely related to catchment characteristics demands less input data, but may require extensive calibration. In this context, a simple Rainfall-Runoff model has been developed specifically for the Mediterranean region. In the following section, the model structure and the hydrological processes will be described and an example of calibration of a Mediterranean catchment will be discussed.

## Reservoir Water Balance

The hydrology and the water balance components of a reservoir are associated with its catchment. If we look more specifically at the reservoir itself, the change in volume of water,  $\Delta V$ , contained over a given period of time can be written as:

$$\Delta V = Q_{in} + P_{lat} + R - Q_{out} - Abs - Leak - E \quad (1)$$

where

$Q_{in}$ =	Reservoir inflow.
$Q_{out}$ =	Spillway outflow (all forms of reservoir release).
$Abs$ =	Abstraction or pumping.
$Leak$ =	Water lost through leakage to the aquifer or through the dam.
$P_{lat}$ =	Water entering the reservoir through groundwater flow.
$R$ =	Rainfall on the reservoir.
$E$ =	Actual evaporation from the reservoir surface.

Probably the most important variable in determining the water balance of a reservoir is the reservoir inflow,  $Q_{in}$ . The reservoir inflow is usually the catchment surface runoff, and for this it is necessary to know something about the physical characteristics of the contributing catchment. Occasionally a reservoir is filled by a local spring and in this case a hydrogeological study of the region is necessary. When  $\Delta V$  exceeds the maximum level of the storage the water flows out the reservoir as spillway flow, which could be recorded. In fact it is more accurate to use than the  $\Delta V$  to calibrate the model. The HYDROMED model considers the components of equation 1 in estimating the  $\Delta V$  or spillway flow. Input to the catchment water balance is mainly the rainfall over the catchment and the reservoir. The losses are mainly due to evaporation and abstraction. The rainfall over the catchment is divided into relatively fast flow to the reservoir (e.g. flow due to exceeding the infiltration capacity, surface runoff from impervious surfaces, flow from surface soil layers due to exceeding the saturation capacity) and slow flow known as base flow following the rain event. The following section will describe the different flow types and the components of the water balance.

## THE HYDROMED MODEL DESCRIPTION.

The HYDROMEI model is a Rainfall-Runoff conceptual model. The model is generic in terms of application as it runs at different time steps and allows different mechanisms to generate runoff by adopting different driving hydrological process. The model time step ranges from less than an hour to one month. The hydrological processes responsible for runoff generation are: infiltration excess, impervious surface runoff, saturation excess and base flow or combination of them. The base flow is computed either from the recorded stream flow data following rainfall events or as a free drainage at the bottom of the soil profile.

### INFILTRATION EXCESS

Infiltration rates for semi-arid catchments can vary enormously even within a few meters.

Surface runoff varies considerably depending on the rainfall intensity, soil surface conditions (roughness, storage capacity, infiltrability etc.) the vegetation cover, soil moisture status and the slope. When the effective rainfall or water supply at the soil surface exceeds the maximum infiltration rate, the excess water accumulates until it exceeds the surface storage then it runs off. There are different ways of modelling the process.

The infiltration excess could be described on the basis of Pitman's approach (1973). The surface runoff is separated into two components: runoff from impervious areas and runoff in excess of the absorption rate. The former is a simple calculation, however the latter is highly unlikely to be uniform throughout the catchment, being influenced by geology, soil type, vegetation and many other factors. Pitman hypothesises that the variability of this absorption rate can be approximated using a symmetrical triangular frequency distribution of absorption rates over the catchment. His hypothesis was tested and proved adequate on test catchments in semi-arid South Africa. The triangular shape has the added advantage of flexibility and mathematical simplicity (see Figure.1). The total area of the triangle must be unity, hence (for  $Z$  being the

absorption rate) :  $H = 2/(Z_{\max} - Z_{\min})$ . The expected runoff from a given input of rainfall,  $r$ , is then given by (Equations 2-4, same units everywhere):

$$\text{For } Z_{\min} \leq r \leq Z_{\text{mean}} : Q = \frac{2(r - Z_{\min})^3}{3(Z_{\max} - Z_{\min})^2} \quad (2)$$

$$\text{For } Z_{\text{mean}} \leq r \leq Z_{\max} : Q = r - Z_{\text{mean}} + \frac{2(r - Z_{\min})^3}{3(Z_{\max} - Z_{\min})^2} \quad (3)$$

$$\text{For } r \geq Z_{\max} : Q = r - Z_{\text{mean}} \quad (4)$$

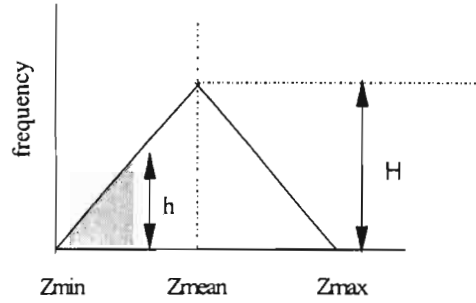


Fig. 1 : Assumed frequency distribution of absorption rate.

The values of  $Z_{\min}$  and  $Z_{\max}$  can be determined using infiltration tests on the catchment. Alternatively, an optimisation routine could be set up in the model during calibration such that the parameters, which produce the best hydrograph fit, are selected. This is the approach taken and presented in this paper.

The time delay of runoff is a variation of the Muskingham equation with the weighting factor set to zero for reservoir-type storage attenuation (Pitman, 1973 and Shaw, 1988):

$$O_{t+1} - O_t = \frac{\Delta t(I_t - O_t)}{k + \frac{1}{2}\Delta t} + \frac{\Delta t(I_{t+1} - I_t)}{2(k + \frac{1}{2}\Delta t)} \quad (5)$$

Where  $O_t$  and  $I_t$  are the flow and lagged flow (respectively) at time  $t$  and is measured in  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ,  $\Delta t$  (time step is variable in this model) is the routing period and  $k$  (h) is the lag of the runoff.  $k$  can be determined using an optimising routine in the calibration program. In HYDROMED model two time delays were considered,  $k1$  for relatively fast flow and  $k2$  for relatively slow flow such as the base flow.

Schematic diagrams of the processes used in the HYDROMED model are shown in Figure.2. The evaporation process incorporated only for daily and monthly time steps as it has negligible effect on runoff magnitude at hourly time step. The base flow of some small catchment could be assigned a zero value if there was no flow detected within hours of the rainfall event. Interception was also negligible (no significant ground cover).

## Base flow

In the HYDROMED model the base flow is estimated from the hydrograph as Base Flow Index or as a free drainage at the bottom of the soil profile.

### I - Base flow index

The base flow index can be thought as measuring the proportion of the runoff that derives from stored sources. The model applies smoothing and separation rules to the recorded flow hydro-graphs for which the index is calculated as the ratio of the flow under the separated hydro-graph, to the flow under the total hydro-graph.

The program calculates the minima of five-hour non-overlapping consecutive periods and subsequently searches for turning points in this sequence of minima. The turning points are then connected to obtain the base flow hydro-graph that is constrained to equal the observed hydro-graph ordinate on any hour when the separated hydro-graph exceeds the observed. The values that the BFI can take are in the region of  $[0,1]$ . A value close to 0 deduces that the catchment is impermeable and the contribution of base flow to an

event is minimal whilst a value close to 1 deduces that the catchment is permeable and the contribution of base flow to the event is significant.

## II- Free drainage at the bottom of the soil profile

In HYDROMED this is calculated at the bottom of two-layers soil model. The surface layer contributes to surface runoff if its moisture content exceeds its saturation level and losses water via evapotranspiration. Its soil moisture is updated at each time step as:

$$\pm\Delta\theta_s = [R - I - E_s - T_s] / Z_s \quad (6)$$

$$\theta_s = \theta_{\text{initial}} + \pm\Delta\theta_s \quad (7)$$

For the sub surface layer

$$\pm\Delta\theta_{ss} = [\text{flux}_s + \theta_{ss} * Z_{ss} - T_{ss}] / Z_{ss} \quad (8)$$

$$\theta_{ss} = \theta_{\text{initial}} + \pm\Delta\theta_{ss} \quad (9)$$

$$\text{flux}_s = [\theta_s - (F.C)_s] * Z_s \quad (10)$$

$$\text{Drainage flux} = [\theta_{ss} - (F.C)_{ss}] * Z_{ss} \quad (11)$$

Where R is rainfall, mm day<sup>-1</sup>, I is the infiltration excess in mm day<sup>-1</sup>, T<sub>s</sub> is transpiration in mm day<sup>-1</sup>, E<sub>s</sub> is the bare soil evaporation in mm day<sup>-1</sup>, Z<sub>s</sub> is surface layer depth in mm, θ<sub>s</sub> is the surface soil moisture in m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, flux<sub>s</sub> is the outgoing flux at the bottom of the surface layer into the subsurface layer in mm day<sup>-1</sup>, subscript 's' refers to surface layer while 'ss' refers to subsurface layer and (F.C) is the soil moisture at field capacity, in m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

The Transpiration, T<sub>s</sub> from the surface layer is calculated as:

$$T_s = \text{ETP} * \text{Veg.Cover} * Z_s / (Z_s + Z_{ss}) * (\theta_s - (W.P)_s) / ((F.C)_s - (W.P)_s) \quad (12)$$

And for the second layer as:

$$T_{ss} = \text{ETP} * \text{Veg.Cover} * Z_{ss} / (Z_s + Z_{ss}) * (\theta_{ss} - (W.P)_{ss}) / ((F.C)_{ss} - (W.P)_{ss}) \quad (13)$$

While bare soil evaporation from surface layer is calculated as:

$$E_s = \text{ETP} * (1 - \text{Veg.Cover} * Z_s / (Z_s + Z_{ss})) * (\theta_s - k(W.P)_s) / ((F.C)_s - k(W.P)_s) \quad (14)$$

Where Veg.cover is a fraction of soil covered by vegetation (ranges from 0 to 1), k is a reduction factor (ranges from 0 to 1), ETP is the potential evapotranspiration.

It is assumed that the Evapotranspiration has insignificant effect on runoff when using a small time step of 1 hour or less. It is also assumed that bare soil evaporation only takes place from the surface layer while the surface and sub-surface layers contribute to transpiration. It is also assumed that that drainage from the bottom of the surface layer to the sub-surface layer and from the bottom of the sub-surface layer takes place when the soil moisture exceeds its value at field capacity.

Values of the soil moisture at saturation, field capacity and wilting point for 14 soil types are available as default values in the model and can also be given as user's input if available from measurements. ETP are daily values as user's input file.

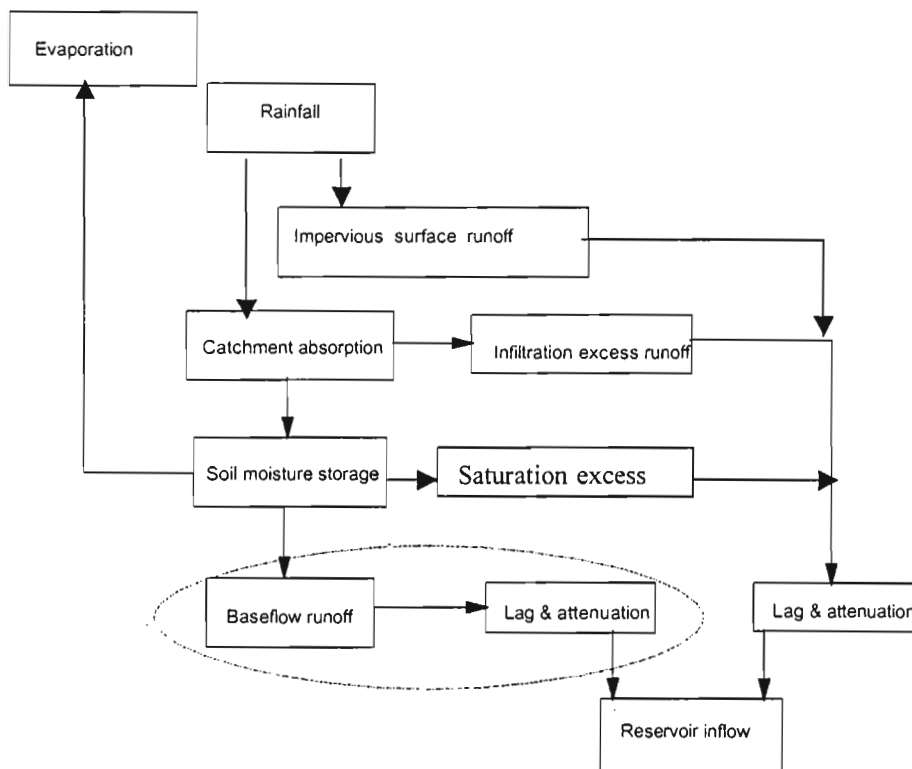


Fig. 2 : Components of the HYDROMED model.

## **HYDROMED RUN OPTIONS**

HYDROMED model run options are:

- 1- Runoff is generated by excess infiltration, surface runoff from impervious areas and a base flow estimated from the hydrograph (this could also be assumed zero if base flow has not been observed in the study site). This option is used for hourly time step (or even less than that) without need for ETP input but can also be applied on daily and up to monthly time step with ETP input required.
- 2- Runoff is generated by excess infiltration, surface runoff from impervious areas, saturation excess from the surface layer and a base flow calculated as a drainage flux in excess of the filed capacity of the sub surface layer. This flux takes place at the bottom of the soil profile of a two layers soil model. If this option is selected then ETP input file will be required and the model should be run using daily or monthly time step.

## **HYDROMED INPUT DATA REQUIREMENTS**

The input requirement is dependant on the selected run option. The following list covers all options:

- 1- Rainfall data over the catchment (and if possible over the lake as well)
- 2- Flow data recorded at the spillway (recommended for calibration) or calculated from volume change in the lake.
- 3- Potential evaporation data for daily or monthly run options.
- 4- Catchment characteristics such as contributing area, lake area, estimate of vegetation fraction, and impervious area fraction.
- 5- Soil characteristics such as infiltration rate range (  $Z_{\min}$  ,  $Z_{\max}$  ) otherwise can be obtained by optimisation using the Genetic Algorithm GA in the model.
- 6- Soil moistures at saturation, field capacity and wilting point. These parameters are available as default values for 14 soil types in the soil menu.



### **HYDROMED input data file type**

The model runs with comma separated variables CSV file e.g. hour, date, and the variable value.  
The model can import data out of data loggers into CSV files.

### **HYDROMED OUTPUT DATA FILE TYPE**

The model provides three types of output:

- 1- Report files as text files easy to handle with other software such as Excel.
- 2- Time series graphs with option to select input or output variable.
- 3- 1:1 figures to compare simulated versus measured variables such as flows.
- 4- Figures and data files could be saved for further use as window meta files, \*.wmf.

### **GOODNESS OF FIT CRITERIA**

There are two options to fit simulated to measured data of the spillway flow or change in volume of the reservoir  $\Delta V$  based on two widely known criterions:

- 1- The Root Mean square error (Minimum)
- 2- The Nash Sutcliff criterion (Maximum)

### **THE GENETIC ALGORITHM, GA OPTIMIZATION TECHNIQUE**

The genetic algorithm library used to calibrate the HYDROMED model is the GALib library developed by the Massachusetts Institute of Technology. It is a set of C++ genetic algorithm objects and includes tools for using genetic algorithms to do optimization in any C++ program.

In the calibration of the model the genetic algorithm tries to minimise/maximize the objective function. The user can manipulate the population size, the number of generations (which is the stopping criteria), the probability of mutation [0,1] and the probability of crossover [0, 1]. The objective score is the value returned by the objective function; it is the raw performance evaluation of a genome. In the case of the HYDROMODEL this objective function is the one that calculates the root mean square or the Nash Sutcliff criterion.

### **RESULTS**

Runoff of catchments in Tunisia occurs so infrequently that there are very few data available for model calibration. Many of the reservoirs that supply the irrigation systems rely on less than a week of rainfall occurring every year. In EL-Guazine catchment the reservoir-filling curve (not shown here) showed that for the three-year period of record, there are only two events, which contribute significantly to the volume.

When there are no gauge data at the inlet of a reservoir, the inflow can be estimated from the change in the reservoir level - and therefore volume (with knowledge of the depth-volume curve). When the reservoir is full, the excess water flows through the emergency spillway. At the El-Goauzine experimental catchment, the spillway is rated and this provides a better estimate of the rate of inflow to the reservoir, even if there is some attenuation of the flow. When the reservoir is full it can be assumed that the catchment is close to saturation and therefore there are less unknowns in the runoff estimation equations and knowledge of the catchment soil moisture store is less crucial (losses, and therefore unknowns are smaller).

An example of model calibration of runoff at the El-Guazine Reservoir is given here under.

**Calibration Results**

**Parameters**

Z Min: 5.056461      Z Max: 5.056461

K (Lag): 3.239434      Fitness: 97.021848

K (Lag2): 0.0     

**Configuration File**

Title: trial 7

Config File: C:\HYDROMED\Configuration Files\Ka

Comments: calibration 7

Fig. 3 : Calibration window of El-Guazine Reservoir

The graphical out put can see in figure 4. This spilling condition occurs only once in the entire period of record available (see end of September, 1995 in Figure 4) for the El-Gouazine catchment, but nevertheless provides a good basis for calibrating the model. Optimising for  $Z_{min}$ ,  $Z_{max}$  and the Muskingham lag parameter,  $k$  results in a good hydrograph fit to observed flow (Figure 5). The Nash Sutcliffe criterion for this calibration fit is 97%. The different modelled flows contributing to the total run off are shown in figure 6.

It is expected that the observed hydrograph deduced from the change in level of the reservoir is likely to be less accurate. In a heavy rainfall event there is likely to be some associated wind reservoir surging, which makes the estimation of the inflow more difficult. In addition, the accuracy of the observed hydrograph has to do with the resolution of the depth recorder measuring the level of the reservoir. It should also be noted that there is only two rain gauges on this catchment for measuring the rainfall.

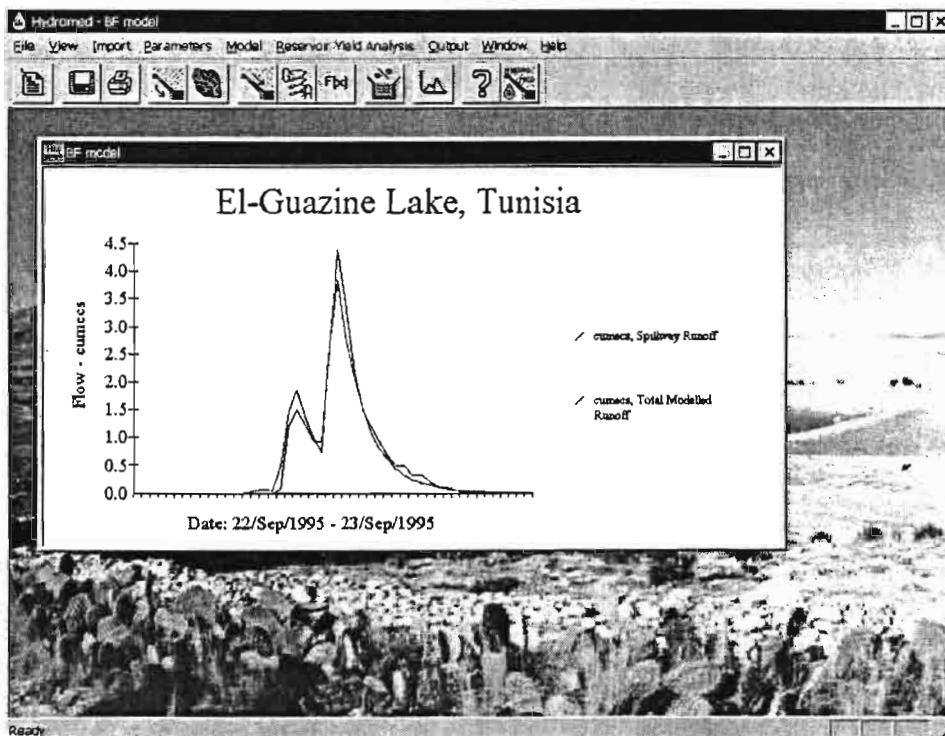


Fig. 4 : Modelled and observed runoff for the Event of 22-23 September 1995 at El-Guazine

The goodness of fit can also be seen in 1:1 graph type as in Figure 5.

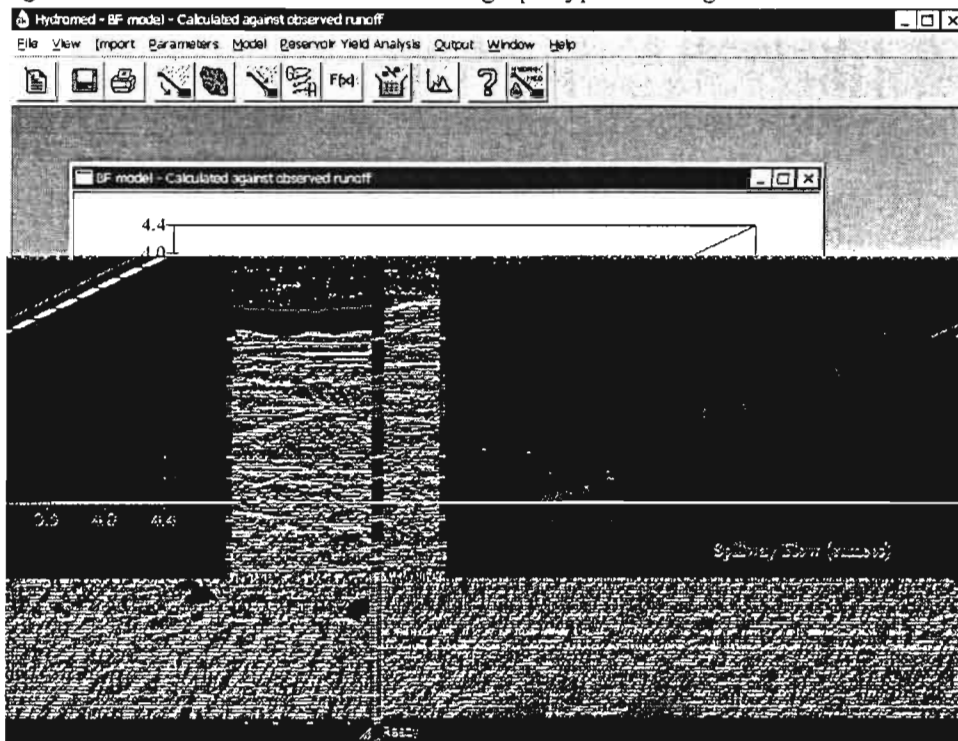


Fig. 5 : 1:1 relation between observed and modelled runoff at El-Guazine

The composition of different types of flow, which adds up to the total runoff flow, can be seen in figure 6.

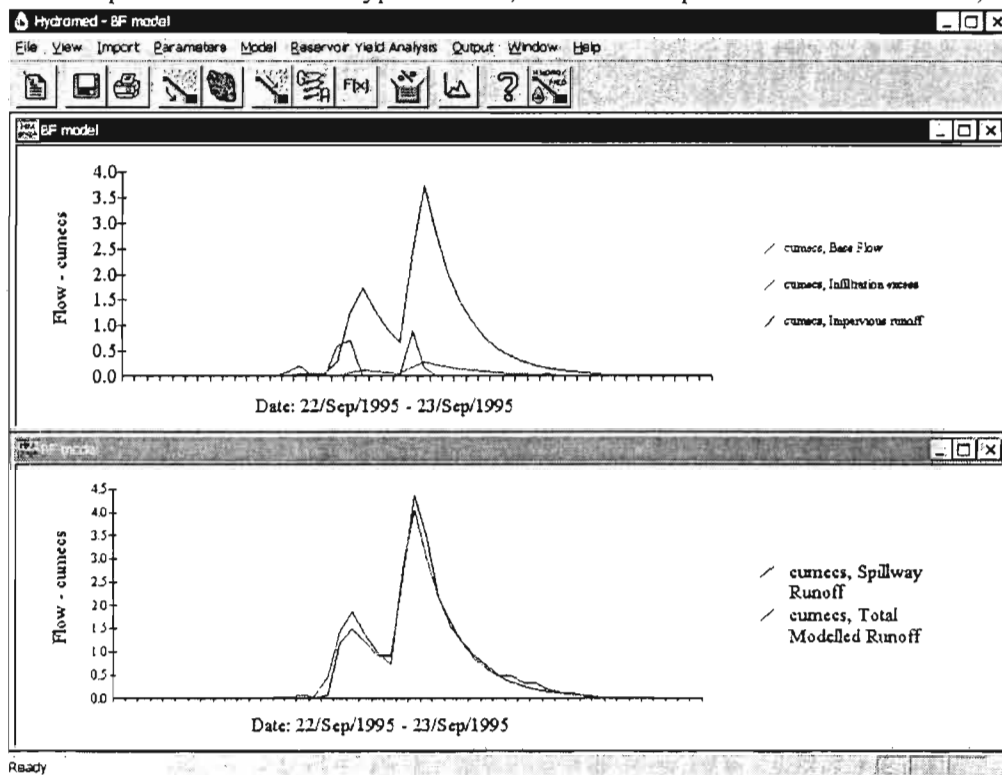


Fig. 6 : Components of the total runoff flow at El-Guazine Reservoir.

## CONCLUSIONS

Because the hydrology of semi-arid is different from humid and sub-humid regions, the HYDROMED model has been developed specifically for the Mediterranean region.

The HYDROMED model has two sub-models, the Rainfall-Runoff (part 1 of this paper). In this part the hydrological processes contributing to the runoff were described together with their mathematical formulation. In part 2 the model deals with the storage capacity of a reservoir required to maintaining a yield with a given probability of failure. The HYDROMED model is a menu driven, easy and friendly to use, and runs under Windows 95 operation system. The model uses the Genetic Algorithm for Optimization and has default values that could be used in absence of measured parameter values. The model has different options to calculate the flows and options for the time steps ranging from less than one hour to one month. The model has facility to import data from data loggers and output results in data files and graphs. An example of calibration for El-Guazine catchment has been given. The model showed excellent ability to simulate the Rainfall-Runoff event.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research work has been 50% funded by the European Commission under HYDROMED project Contract ERBIC 18 CT 96-0091 and 50% by the Natural Environment Research Council, NERC, UK. The constructive discussions and support of the Coordinator of the Project Dr. Jean Albergel of IRD, France is sincerely appreciated. Thanks are also extended to IRD and INGRES, Tunis, Tunisia for supplying the data set used in the example.

## REFERENCES

- GHINI, M., TSOUMANIS, P. & TSIBIDIS, S. 1995. Analysis of integrated water resources management: Pilot study for Epiros water district in Greece. Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 293-303. Balkema, Rotterdam,
- GOMER, D. 1996. *Ecoulement et erosion dans des petits bassins-versants a sols marneux sous climat semi-aride mediterraneen*. Projet Pilote d'Amenagement Integre du Bassin-Versant de l'Oued Mina, Eschborn.
- PITMAN, W.V. 1973. *A mathematical model for generating monthly river flows from meteorological data in South Africa*. Univ. of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, Hydrological Research Unit.
- PRINZ, D. 1995. Water harvesting in the Mediterranean environment - It's past role and future prospects. Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 135-44. Balkema, Rotterdam,
- SHAW, E.M. 1988 *Hydrology in practice*. 2<sup>nd</sup> Edition. VNR International.



# HYDROMED MODEL AND ITS APPLICATION ON SEMI-ARID MEDITERRANEAN CATCHMENTS WITH HILL RESERVOIRS

## 2- RESERVOIR STORAGE CAPACITY & PROBABILITY OF FAILURE MODEL

Ragab R.

*Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, OX10, 8 BB, UK*

### ABSTRACT

This paper addresses the issue of “what is the reservoir storage capacity that is required to maintain a yield with a given probability of failure”. It is a very important issue in terms of construction and cost. HYDROMED model, which has been developed under the HYDROMED project, offers a solution based on the Gould probability matrix method. In the HYDROMED model, the probability of failure is calculated on monthly basis. The Model has been applied on El-Guazine catchment in Tunisia using a long data record of Kairouan (monthly data are available from World Climate Disc, CRU, 1990 from 1900 to present) together with the Horton parameters derived for the El-Gouazine catchment based on the local gauges. The evaporation data were based on the Pan evaporation measurements available at the site while the abstraction figures were based on available literature. Estimation of the probability of failure has been obtained for different months of the year. The Probability of failure differed from winter to summer. Generally, the probability of failure goes to near zero when the reservoir capacity is 500, 000 m<sup>3</sup>. The 25% probability of failure (75% success) could be achieved with a reservoir capacity of 58,000 m<sup>3</sup> in June and 95,000 m<sup>3</sup> in January. The Probability of failure of a reservoir of 240,000 m<sup>3</sup> capacity (closer to storage capacity of EL-Guazine 233, 000 m<sup>3</sup>) is around 5% in November, December and January, around 3 % in March, and around 1.1 % in May and June. Consequently there is no high risk of El-Guazine to run dry / submerged at a capacity of 233,000 m<sup>3</sup>. Subsequently, benefits, in terms of probability of failure, by increasing the reservoir volume of EL-Guazine greater than 250.000 m<sup>3</sup> mark are not high. This is important for the design engineers and the funding organization. However the analysis is based on the existing water abstraction policy, absence of siltation rate data and on the assumption that the present climate will prevail during the lifetime of the reservoir. Should these conditions change, a new analysis should be carried out.

### KEYWORDS

HYDROMED, Reservoir, storage capacity, probability of failure, Mediterranean

### INTRODUCTION

The design of a reservoir is concerned with determining the storage capacity required to maintain a yield with a given probability of failure. The cost of building the reservoir increases exponentially with the height of the dam. On the other hand a reservoir, which is too small, will not serve its purpose and there will be a shortage of water on a regular basis. A balance between costs of building, net gain (in financial or social terms) from having the reservoir and the probability of failure (and cost of failure) should be reached.

There are three broad methods for the design procedure (Parks and Gustard, 1982). The “critical period technique” is an analysis of the events where yield exceeds demand. The “probability matrix method” is where the probability of the reservoir reaching a given storage condition from a previous condition is analysed. The third method uses stochastically generated flow data for assessing the error in assessing capacity. Storage yield methods are described in McMahon and Mein (1978).

High evaporation rates and low, sporadic rainfall rates in semi-arid regions make the calculations more difficult (and important), and as with any statistical analysis, a lack of data results in a lack in confidence of the results.

In reservoir terminology a critical period is the period during which the reservoir goes from full to empty without spilling in the intervening period. The critical period technique for reservoir yield analysis involves the use of the historical inflow record and projected demand to simulate the volumetric behaviour of the reservoir. The method uses the mass storage equation and requires the historical inflows (stream flow and

rain), outflows (including evaporation, spillage and any other losses) and an assumed active storage capacity (Equation.1).

$$V_{i+1} = V_i + I_i - Abs_i - E_i - D_i \quad (1)$$

$I$  is the inflow,  $Abs$  is the abstraction pattern  $E$  is the evaporation and  $D$  are reservoir releases. Any other inflows or outflows are easily incorporated as needed.

Provided that a sufficiently long record is available, the simulation is run and the numbers of failures (reservoir becoming empty) are counted. The simulation is then re-run using a different active storage assumption or demand scenario until an acceptable balance is achieved between active storage required, demand and probability of failure.

The Moran probability matrix method (Moran, 1959) treats time and water as discrete variables. The reservoir volume is subdivided into a number of zones thus creating a system of equations, which approximate the integral equations. The analysis is then carried out with the initial reservoir contents at each of the zones and using each year of input data thus making use of all available data. In this method, the period of time is divided into a wet season (all inflows, no outflows) followed by a dry season (all outflows and no inflows), though a simple modification of this procedure (described by McMahon and Mein, 1978) allows inflows and outflows to occur simultaneously.

A further modification to the Moran method was suggested by Gould (1961). His method allows for simultaneous inflows and outflows, seasonality of flows and serial correlation of inflows. This was done by using a transition matrix of yearly time period, but accounting for within-year flows by using behavioural analysis. This method allows for the use of non-continuous flow records, sampling all years of data regardless of the historical sequence and as such is much less demanding on the data. Perhaps more importantly, the computed storage estimates are independent of the initial starting contents of the reservoir (a major problem with simulation analysis). The Gould probability matrix method has been applied successfully in many regions of Africa. Parks *et al.* (1989) applied the Gould method to catchments in Botswana for estimating the effect of rationing on the probability of failure of a reservoir.

Problems occur with implementing the probability matrix method when there is a lack of flow data. Normally a flow series can be generated based on a nearby raingauge or regionalisation procedure and a crude assumption about the likely runoff volume from this rainfall (Hortonian runoff usually assumed for semi-arid catchments).

The Gould probability matrix method has been applied successfully in many regions of Africa. Parks *et al.* (1989) outlined some practical considerations to its application which are summarised here:

- 1- The inflow series should not be correlated otherwise a correction is required to the solution, though annual serial correlation is often negligible in semi-arid and arid regions. Gould (1961) provides a table of suitable corrections to correlated data. Experience in South Africa and also the Nile basin shows that serial correlation can be quite high.
- 2- The method can produce very different results for seasonal flow regimes (dependent on the starting month of the analysis). This could be avoided by starting the analysis towards the end of the dry season.
- 3- Care should be taken that the method does not "double account" when failures occur after the wet season.

## THE HYDROMED MODEL

The model adopts the Gould probability matrix and employs equation 1 with allowance for siltation rate (If available).

## USER INPUTS

1. Evaporation factor. This is a correlation factor to convert Class A pan evaporation rate into evapotranspiration rate. They are a set of 12 factors representing the e-factors for each month.
2. Abstraction.
3. Inflow. The inflow used is estimated inflow data from the world climate disk station at Kairouan with some adjustments. The data should be loaded in a two dimensional array of doubles that denotes inflow during a specific year and month.
4. Start month. The user should be able to enter the start month, which should be loaded, into an integer.

5. Years. The user should be able to enter the number of years of Inflow data that has been provided which should be loaded into an integer.
6. Capacity. The user is able to enter the capacity of the reservoir.

## STEP BY STEP COMPUTATION OF THE PROBABILITY OF FAILURE

1. Decide on abstraction quantities and any releases that may be required.
2. Determine the net evaporation from the reservoir as a function of its contents (and therefore surface area) and time of year.
3. Set up a tally sheet to construct the transition matrix (a 2-dimensional array). This is done by dividing up the reservoir into 20 (or more) equal volume zones (including exactly empty and exactly full).
4. Apply the continuity equation (see below) for reservoir balance starting the reservoir in each of 20 zones and for each of the years of monthly data available and tally the number of times the reservoir “ends up” in each of the zones. Divide each column by  $N \times K$  where  $N$  is the number of years of data and  $K$  is the number of zones.

$$V(t+1) = V(t) + Q_{in}(t) - Abs(t) - \Delta E_{net}(t)$$

5. Count the number of times (and number of months) the reservoir fails for each of the starting zones. Divide each entry by  $12 \times N$ .
6. Compute the steady state matrix of the first matrix by any technique. The “power up” technique has been chosen whereby the matrix is multiplied by itself until it reaches steady state. An alternative is to solve by simultaneous equations.
7. The multiplication of the two matrices derivatives gives the probability of failure of the reservoir.

## RESULTS

### *The Gould probability matrix method for likelihood of reservoir failure studies: application on El-Gouazine catchment, Tunisia.*

As an Example, monthly raingauge data at Kairouan (monthly data are available from World Climate Disc, CRU, 1990 for 1900 to present) are used together with the Horton parameters derived for the El-Gouazine catchment based on the local gauges. The evaporation figures were based on the Pan evaporation measurements available at the site while the abstraction figures were based on available literature.

TABLE.1. Average monthly evaporation and abstraction values of El Gouazine catchment.

Month	Jan.	Feb	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
E mm	201	230	230	259	287	287	259	230	230	201	173	172
Abs m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup>	0	0	8	10	12	15	0	0	0	0	0	0

Irrigation is assumed to take place only during the required part of the growing season. The total catchment area is 1810 ha and the reservoir capacity is  $233 \times 10^3 \text{ m}^3$ .



**Probability of Reservoir Failure**

<b>Reservoir Outputs</b> Evaporation File: <input type="text" value="D:\HMInfo\Evaporation.dat"/> mm/Month Evaporation Factor File: <input type="text" value="D:\HMInfo\Reservoir Yiel"/> ... Siltation File: <input type="text" value="D:\HMInfo\Reservoir Yiel"/> m3/Month Abstraction File: <input type="text" value="D:\HMInfo\Reservoir Yiel"/> m3/Month		<b>Reservoir Capacity</b> Start: <input type="text" value="10.0"/> 1000's m3 End: <input type="text" value="1000.0"/> Major Unit: <input type="text" value="20.0"/> Surface Area File: <input type="text" value="D:\HMInfo\Reservoir Yi"/> m2	
<b>Reservoir Inputs</b> Start Month: <input type="text" value="4"/> No of Years: <input type="text" value="89"/> Inflow File: <input type="text" value="D:\HMInfo\Reservoir Yiel"/> m3/Month		<b>Results</b> Output File: <input type="text" value="D:\HMInfo\Reservoir Yi"/> <input checked="" type="checkbox"/>	
<input type="button" value="OK"/>		<input type="button" value="Cancel"/>	

Fig. 1 : Input windows for calculation of the probability of Failure

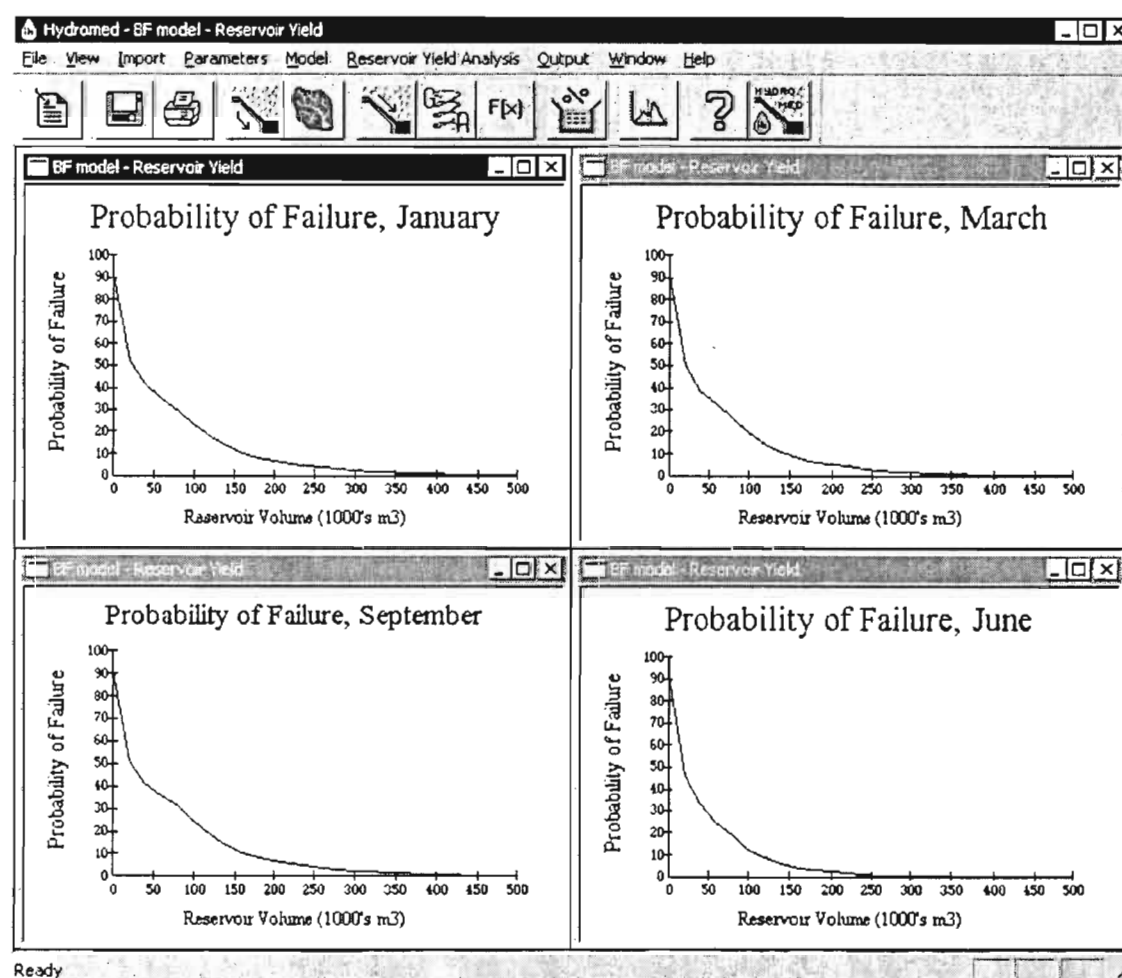


Fig. 2 : Reservoir probability of failure at El-Guazine, Tunisia for different times of the year.

It can be seen that the probability of failure differs from January where possibly the supply is greater than the demand when compared to June where the demand is greater the supply. Generally, the probability of failure goes to near zero at reservoir capacity of 500,000 m<sup>3</sup>. The 25% Probability of failure (75% success) could be achieved with a reservoir capacity of 58,000 m<sup>3</sup> in June and 95,000 m<sup>3</sup> in January. The Probability of failure of a reservoir of 240,000 m<sup>3</sup> capacity (closer to storage capacity of EL-Guazine 233,000 m<sup>3</sup>) is around 5% in November, December and January, around 3 % in March, and around 1.1 % in May and June.

Consequently there is no high risk of El-Guazine to run dry / submerged at a capacity of 233,000 m<sup>3</sup>. In such case, benefits by increasing the reservoir volume greater than 250,000 m<sup>3</sup> mark are not very high. This is important knowledge for the design engineers and the funding organization.

One should remember that this analysis is based on the data at hand, which might not be accurate enough as it is based on literature and crude assumptions. One also should consider that the effect of erosion and the silting rate, which affect the storage capacity of the lake, is missing at present however it can be included in the calculation as and when silting rate data become available. Especially where there are problems with erosion, there are problems with siltation of the reservoir and this adds a whole new dimension to the estimation of the probability of failure of a reservoir. Estimating the likely rate of siltation of a reservoir is difficult because the rate of erosion increases exponentially with the rate of rainfall. At the extreme end, and as has been seen on catchments in Tunisia, reservoirs have become completely full of silt from only one rainfall event. If a standard rate of siltation (by volume) of the reservoir is assumed, then an appropriate adjustment can be made when consulting the probability of failure versus capacity graph on a year-by-year basis. Climate change and its impact should be considered when designing new reservoirs. The climate change scenarios suggest that the Mediterranean region will become hotter and dryer.

## **LIMITATIONS AND BENEFITS OF THE GOULD PROBABILITY MATRIX METHOD**

1. This method assumes that the annual serial correlation of flow is zero. This is probably true for most semi arid catchments.
2. The method produces slightly different results depending on the month in which the simulation starts.
3. The procedure samples all years of data without reference to the sequence and therefore is particularly suitable for catchments with patchy data.
4. Results are independent of the initial reservoir conditions.
5. The method assumes stationarity in both climate and reservoir conditions such as siltation and abstraction policies.

## **CONCLUSIONS**

The Gould probability matrix method has been successfully implemented in the HYDROMED model. The probability of failure has been calculated on monthly basis for El-Guazine catchment in Tunisia using a long data record of Kairouan. Estimation of the probability of failure has been obtained for different months of the year. Generally, the probability of failure goes to near zero at reservoir capacity of 500,000 m<sup>3</sup>. The 25% Probability of failure (75% success) could be achieved with a reservoir capacity of 58,000 m<sup>3</sup> in June and 95,000 m<sup>3</sup> in January. The Probability of failure of a reservoir of 240,000 m<sup>3</sup> capacity (closer to storage capacity of EL-Guazine 233,000 m<sup>3</sup>) is around 5% in November, December and January, around 3 % in March, and around 1.1 % in May and June. Consequently there is no high risk of El-Guazine to run dry / submerged at a capacity of 233,000 m<sup>3</sup>. Benefits, in terms of probability of failure, by increasing the reservoir volume greater than 250,000 m<sup>3</sup> mark are not so high. This is important knowledge for the design engineers and the funding organization. However one should bear in mind that the present analysis is based on the existing water abstraction policy, absence of siltation rate data and on the assumption that the present climate will prevail during the lifetime of the reservoir.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

This research work has been 50% funded by the European Commission under HYDROMED project Contract ERBIC 18 CT 96-0091 and 50% by the Natural Environment Research Council, NERC, UK. The constructive discussions and support of the Coordinator of the Project Dr. Jean Albergel of IRD, France is

sincerely appreciated. Thanks are also extended to IRD and INGRES, Tunis, Tunisia for supplying part of the data/information used in the example.

## REFERENCES

- CRU, World Climate Disk, Climate Research Unit, University of East Anglia, Norwich, UK
- GHINI, M., TSUMANIS, P. & TSIBIDIS, S. 1995. Analysis of integrated water resources management : Pilot study for Epiros water district in Greece. Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 293-303. Balkema, Rotterdam,
- GOMER, D. 1996. *Ecoulement et erosion dans des petits bassins-versants a sols marneux sous climat semi-aride mediterraneen*. Projet Pilote d'Amenagement Integre du Bassin-Versant de l'Oued Mina, Eschborn.
- GOULD, B.W. 1961. Statistical methods for estimating the design capacity of dams. *Journal of the Institution of Engineers, Australia*, **33** (12), 405-16.
- MCMAHON, T.A. & MEIN, R.G. 1978. Reservoir capacity and yield. In: Chow, V.T. (Ed.), *Developments in water science*. Elsevier,
- MORAN, P.A.P. 1959. The theory of storage. Methuen, London.
- PARKS, Y.P., FARQUHARSON, F.A.K. & PLINSTON, D.T. 1989. Use of the Gould probability matrix method of reservoir design in arid and semi-arid regions. Anonymous *The State-of-the-Art of Hydrology and Hydrogeology in the Arid and Semi-Arid Areas of Africa*. pp 234-41. IWRA,
- PARKS, Y.P. & GUSTARD, A. 1982. A reservoir storage yield analysis for arid and semiarid climates. Anonymous *Optimal Allocation of Water Resources*. pp 49-57. LAHS,
- PRINZ, D. 1995. Water harvesting in the Mediterranean environment - It's past role and future prospects. Anonymous *Water Resources Management under Drought or Water Shortage Conditions*. pp 135-44. Balkema, Rotterdam,
- SHAW, E.M. 1988 Hydrology in practice. 2<sup>nd</sup> Edition. VNR International.

# LES PETITS BARRAGES DANS LA ZONE SEMI-ARIDE MEDITERRANEENNE.

Albergel J., Selmi S. & Balieu O.

*Mission IRD de Tunis, B.P. 434 1004 Tunis El Menzah*

## RESUME

Cette communication présente les petits barrages en zone semi-aride méditerranéenne et étudie leurs impacts, a posteriori, sur les populations riveraines et l'environnement. Un rappel historique permet de montrer l'importance de ces ouvrages dans les politiques d'aménagement du territoire et leurs objectifs. Le développement de ces ouvrages hydrauliques est étudié dans cinq pays du Maghreb et du Moyen Orient et comparé.

L'impact sur les populations est présenté en distinguant deux phases : la phase d'investissement au cours de laquelle les ouvrages sont réalisés et la phase de fonctionnement, plus ou moins longue suivant le taux d'envasement des retenues.

L'impact sur l'environnement a été étudié à travers trois thèmes principaux : la recharge des nappes phréatiques à partir de la retenue d'eau en surface, la protection des infrastructures en aval de la retenue et la qualité des eaux retenues. A partir du bilan hydrologique d'une retenue, la communication discute de la gestion des volumes d'eau.

## INTRODUCTION

Au début des années 90 la construction de petits barrages semble prendre le pas sur la politique des grands travaux hydrauliques des années soixante-dix et quatre-vingt au Maghreb et au Machrek. En Tunisie, près de 500 petits barrages ont été construits dans la décennie 1991-2000.

Les lacs ou barrages collinaires sont des retenues créées par une digue en terre. Leur capacité va de quelques dizaines de milliers à un million de mètres cubes d'eau recueillis sur des bassins versants d'une superficie variant de quelques hectares à quelques dizaines de kilomètres carrés. Ils s'intègrent de façon naturelle dans le paysage sans créer de nuisance particulière. Ils sont aptes à réguler les flux hydriques susceptibles de maintenir les populations en place en leur assurant de réelles possibilités de développement. Leur construction vise les objectifs suivants : protection des infrastructures en aval (ville, barrage, périmètre agricole) contre les crues et contre l'érosion ; mise à disposition d'une ressource en eau de manière disséminée dans le paysage pouvant servir à l'alimentation humaine, à l'abreuvement du bétail, à la micro-irrigation, etc. ; amélioration de l'environnement : création d'oasis, reboisement, captage du ruissellement et recharge des nappes phréatiques.

A partir des données recueillies par un réseau de suivi du fonctionnement hydrologique de petits barrages en Tunisie (Albergel & Rejeb, 1997), d'enquêtes socio économiques menées sur les mêmes barrages (Talineau et al, 1994) et des premiers résultats du programme de recherche pluridisciplinaire sur les lacs collinaires dans le pourtour semi-aride du bassin méditerranéen : HYDROMED (Albergel & Claude 1998) au Liban, au Maroc et en Syrie, ce papier montre les avantages et les faiblesses de ce type d'aménagement et cherche à tirer quelques leçons pour leur gestion.

## APERÇU HISTORIQUE ET GEOGRAPHIQUE DES LACS COLLINAIRES

Les retenues collinaires actuellement, très fréquentes dans plusieurs régions, sont inspirées de principes précurseurs vieux de plusieurs millénaires. Dès le premier siècle après J. C., les Yéménites avaient construit un grand nombre de petits ouvrages dans les vallées et en avaient même creusé le long des pentes. De nombreux barrages, aujourd'hui complètement envasés ont été construits au début de l'aire chrétienne dans tout l'empire romain. Un des plus spectaculaires de ces barrages est celui de Badiéh dans les steppes syriennes, sur la route de Palmyre. Ce barrage construit en pierre et d'une capacité d'environ 100 000 m<sup>3</sup> a été réhabilité dans les années 80 puis à nouveau envasé (Kara Damour & Miski; 1997).

En Europe, de telles infrastructures sont très répandues en Italie et en France, dans les coteaux de Gascogne les marges pyrénéennes et le Massif Central. Le principe moderne de la construction des lacs collinaires est né en Italie du Nord vers l'année 1951 (Darves-Bornoz et Clement, 1957). Au Maghreb, le

développement de cette technique de collecte des eaux et de protection des grandes infrastructures s'est instruit de la réussite de l'expérience italienne. Les lacs collinaires constituent aujourd'hui dans les pays du Maghreb et du Moyen Orient une technique de collecte des ressources en eau de surface utilisée pour plusieurs usages. Le Tableau 1 montre l'importance de ces ouvrages dans quatre pays du sud et de l'est du bassin Méditerranéen.

#### **Au Maroc : de petites unités pour l'abreuvement du bétail et des plus grandes pour l'alimentation en eau potable ou l'irrigation**

L'utilisation de la technique de lacs collinaires au Maroc est fort ancienne. Bien avant l'entreprise italienne (Benyounes, 1985), les associations d'éleveurs d'ovins et de caprins ont aménagé de petites retenues collinaires dites "Rdirs" dans les collines situées à la limite de l'aridité (100 à 400 mm). Puis, fascinés par la réussite italienne et en fonction des possibilités techniques nouvelles que donnaient les machines de terrassement, les responsables marocains ont réétudié le concept de l'aménagement collinaire et un plan d'équipement de tout le territoire collinaire au moyen d'un ouvrage tous les 10 km a été mis en œuvre. En 1953, on a avancé le chiffre de 200 aménagements ainsi réalisés (Benyounes, 1985).

Suite aux années de sécheresse du début de la décennie 80; les nouveaux lacs collinaires "modernes" sont de plus grande taille: la capacité des réservoirs s'étend de 120 000 à 200 000 mètres cubes. Les bassins versants des retenues varient de 5 à 10 km<sup>2</sup>. Construits avec la participation des populations locales, ces ouvrages ont été appréciés des éleveurs des hauts plateaux en raison surtout de leur bonne efficacité technique. En 1985, suite à une période de sécheresse importante, l'Etat marocain élabore un vaste programme visant à couvrir tout le territoire national marocain par 500 lacs et barrages collinaires avec une priorité pour des unités de 0.5 à 5 millions de mètres cubes. Les ministères des travaux publics, de l'agriculture et de l'intérieur sont impliqués par le projet. Actuellement 50 unités moyennes et quelques dizaines de petites retenues sont fonctionnelles.

#### **Les lacs en Tunisie : un court historique plein d'enseignements**

En Tunisie, la technique des lacs et retenues collinaires a été introduite au début de ce siècle dans la région de Bizerte au nord du pays. Au départ la rentabilité de ce type d'aménagement a été jugée meilleure dans les bioclimats humides et subhumides (El Amami, 1983). El Amami estimait le nombre souhaitable d'implantation de ces ouvrages à une centaine d'unités. Comme tout aménagement traditionnel construit avec l'emploi de matériaux rudimentaires (terre) et des moyens techniques sommaires, les retenues collinaires de cette époque étaient de petite taille.

Après une assez longue période d'abandon du choix de ces infrastructures, c'est à la fin des années soixante que l'on s'intéresse de nouveau aux lacs collinaires. On imaginait déjà pouvoir maîtriser les flux hydriques de surface en agissant directement à l'amont comme sur le Haut Merguellil où une quarantaine de lacs collinaires, conçus et réalisés au cours d'un programme tuniso-américain, ont vu le jour entre 1968 et le milieu des années 1980.

Toujours dans une optique de protection des zones aval et de lutte générale contre l'érosion, ont été construits une quarantaine de lacs collinaires éparpillés sur toute la zone semi-aride du pays allant de Nabeul au Nord-Est jusqu'au sud de Siliana et Kairouan. En 1990 le nombre de lacs collinaires réalisés grâce aux investissements de l'Etat était estimé à 87, permettant de retenir théoriquement et annuellement quelques 5 millions de mètres cubes d'eau utilisée pour différentes fins (recharge de nappe, abreuvement du cheptel et irrigation de complément).

Au début des années 1990 le projet de construction de 1000 lacs collinaires de petite taille (autour de 100 000 m<sup>3</sup>) et de 200 unités plus grandes (1 000 000 m<sup>3</sup>) devient une priorité de la Direction de la Conservation des Eaux et du Sol (CES) du Ministère de l'Agriculture tunisien. Des objectifs de conservation des eaux et des sols mais aussi de développement agricole et de sont dévolus à ces aménagements.

TABLEAU 1 : Les petits barrages dans le semi aride du pourtour méditerranéen

	Liban	Maroc	Syrie	Tunisie
Nombre de petits barrages réalisés (1997)	2 petits réservoirs nombreux micro	50 moyens + nombreux petits	43 moyens 100 petits	450 petits 40 moyens
Projets en cours	Trente petits	Objectifs 500 avec une priorité por des unités de 0.5 à 5 M m3	Trente petits ou moyens	1000 petits et 200 moyens
<u>Objectifs</u>				
AEP	Oui	Oui	Oui	Non
Protection aval	Crues	Crues et envasement gds barrages	Crues	Crues et envasement gds barrages
Recharge nappes	Oui	Oui	Oui	Oui
Pisciculture	Oui	Oui	Oui	Oui
Environnement	Oui	Oui	Oui	Non
Loisir	Oui	Oui	Oui	Oui
Décideur de la réalisation	Min. de l'irrigation Plan Vert Privé	Min. des TP Min Agriculture Min Intérieur	Min de l'irrigation	Min. Agriculture DCES <sup>2</sup> et DGTH <sup>3</sup>
Mode de réalisation	En régie Centralisé	En régie et utilisation intensive de main d'œuvre Centralisé	En régie Centralisé	Entreprise privée après appel d'offres Décentralisé
Remembrement, redistribution des terres		Suivant les barrages	Oui	Non pour les lacs collinaires, oui pour les barrages
Responsable de l'exploitation	Ministère de l'irrigation	Min. de l'intérieur Cercle	Min. de l'irrigation. Direction de bassin	Min. de l'agriculture (CRDA <sup>4</sup> )
Organisation des utilisateurs		Si AEP, société de distribution des eaux. Privée ou collective AUEA <sup>5</sup> .	Centralisée, gestion par la direction de bassin	Encouragement à la création d'AIC <sup>6</sup> et de comités de gestion
Tarification de l'eau		Oui : couverture des frais d'exploitation	Oui : couverture des frais d'exploitation	Non pour les lacs. Oui pour certains barrages par Groupement de producteurs
Etudes et suivis	Faibles	Importantes	Moyennes	Importantes

(<sup>1</sup>)La Commission Internationale des Grands Barrages fixe comme limite inférieure une hauteur d'ouvrage de 15 m. Nous considérons comme petits barrages des ouvrages d'une hauteur inférieure à 15m et d'une capacité inférieure à 5 millions de m3 en distinguant les micro réservoirs (<50 000 m3), les petits réservoirs ou lacs collinaires (50 000 à 500 000 m3) et les moyens réservoirs ou barrages collinaires (500 000 à 5 000 000 m3). (<sup>2</sup>) DCES : Direction de la Conservation des Eaux et des sols (<sup>3</sup>) DGTH : Direction des Grands Travaux Agricoles (<sup>4</sup>) CRDA : Commissariat Régional de développement Agricole (<sup>5</sup>) AUEA : Association d'Usagers des Eaux Agricoles. (<sup>6</sup>) AIC Association d'Intérêt collective

### En Syrie : des petits barrages de différentes tailles

Le petit barrage est connu en Syrie depuis le début de notre ère. De nombreuses ruines attestent de leur présence dans les steppes sèches. Actuellement, les barrages ayant moins de 25 mètres de hauteur de digue sont gérés par le Ministère de l'irrigation. Cent soixante lacs sont actuellement répertoriés, ils s'étendent de la région humide avec 1500 mm de pluie annuelle à la région sèche inférieure à 100 mm (Kara Damour & Miski, 1997).

Outre leurs objectifs traditionnels de recharge des nappes, de protection des infrastructures aval et d'utilisation des eaux mobilisées pour des fins domestiques et agricoles, les petits barrages en Syrie sont exploités par les pisciculteurs et les usagers de la nature (tourisme, loisir, etc.).

## Les petits barrages du Liban : un nombre réduit

Au Liban, on dénombre seulement 2 petits barrages et de nombreuses micro-réalisations. La création de ces ouvrages relève de la responsabilité du ministère de l'irrigation et du Plan vert. Une trentaine de petits barrages ont été prévus.

Comme en Syrie, les lacs et barrages collinaires sont réalisés en régie. Leurs objectifs sont nombreux (recharge, protection, développement, environnement, etc.).

## IMPACTS DES PETITS BARRAGES SUR LES POPULATIONS

Bien que la variabilité des potentialités naturelles soit forte entre les régions, les petits barrages du semi aride méditerranéen sont généralement situés à l'amont des plaines à fort développement agricole, dans des paysages de petites montagnes aux conditions naturelles contraignantes, économiquement pauvres et connaissant d'importants handicaps socio-institutionnels. Dans une majorité de cas, le stockage des eaux de ruissellement et leur mise à disposition pour des usages variés constituent un levier important pour le développement de ces zones (Selmi, 1996).

Les études récentes d'évaluation, a posteriori, des programmes de construction de petits barrages mettent l'accent sur deux types d'impacts sur les populations : les impacts pendant les phases d'investissement et de construction des ouvrages et ceux pendant la durée de fonctionnement de l'ouvrage hydraulique.

### Impacts des programmes de construction de petits barrages sur les populations pendant la phase d'investissement.

Durant les deux dernières décennies les programmes de construction de petits barrages et d'aménagement hydraulique des petits bassins versants ont mobilisé d'importants investissements. Le tableau n°2 donne les investissements prévus par le VIII<sup>ème</sup> plan de l'Etat Tunisien (1996) pour la mobilisation des eaux. On remarquera que les petits barrages et barrages collinaires mobilisent avec 500 millions de dinars, 25 % des investissements pour l'équipement hydraulique du pays.

TABLEAU n°2 : Investissements pour la mobilisation des ressources en eau en Tunisie (VIII<sup>ème</sup> plan)

Type d'ouvrage	Nombre	Volume mobilisé Millions de m <sup>3</sup>	Investissement prévu. Millions de Dinars <sup>1</sup>	Coût du m <sup>3</sup> mobilisé en Dinars
Grands barrages	21	739	623	1.2
Barrages collinaires	203	110	400	3.6
Lacs collinaires	1000	50	100	2
Ouvrages d'épandage	4000	43	38	0.9
Forages d'exploitation	610	288	55	
Forages de	1150	-	170	0.8
reconnaissance	98	200	285	1.4
Station d'épuration				
Total		1430	1958	

(<sup>1</sup>) 1 dinars ≈ 0.87 US \$

Que la construction de l'ouvrage soit réalisée en régie ou par des entreprises privées (cas de la Tunisie), celle-ci utilise de manière intensive la main d'œuvre locale. La construction de barrage s'accompagne souvent d'un aménagement du bassin versant pour diminuer les risques d'envasement (plantations, rectification de ravins, édification de banquettes...). Celui ci est souvent réalisé avec des chantiers utilisant des personnes au chômage. Les chantiers d'aménagement de bassins versants et de protection de périmètres irrigués liés à la construction de trois petits barrages dans la province d'Errachidia au Maroc a procuré 687 400 journées de travail à des chômeurs. Les salaires perçus par la même main d'œuvre dans cette province du Royaume du Maroc a été 2.5 Millions de Dirhams (1 DH ≈ 0.12 US\$) (El Mohamadi, 1994) par petit barrage construit.



A cette création d'emploi directe il faut ajouter un certain nombre d'activités induites comme les commerces, restaurants et services autour des chantiers. L'encadrement des ouvriers non qualifiés durant les travaux de réalisation permet la formation et l'acquisition de compétences dans les domaines de la construction en général et celui des ouvrages hydrauliques en particulier.

L'expérience tunisienne a fait émerger des compétences dans le secteur privé en technologie appropriée à la construction d'ouvrages hydrauliques. La création de bureaux d'études et d'entreprises de travaux publics privés a été encouragée par l'état (aides financières, aide à la reconversion de fonctionnaires dans le privé...). Ces bureaux d'études et entreprises qui ont démarré sur les marchés publics du programme de mobilisation des eaux ont très vite diversifié leur activité. Ce programme a créé aussi un marché nouveau pour les industries hydromécaniques nationales et développé celui des matériaux de construction, tuyaux... Il a amélioré l'activité de nombreuses entreprises locales (location de camions, fourniture de matériel d'irrigation...).

### **Impacts des petits barrages sur les populations pendant la phase de fonctionnement.**

Boufaroua et Albergel (2000) ont montré la très forte hétérogénéité dans la durée de vie de ces petits barrages. Une modélisation de l'envasement de ces ouvrages réalisés sur une trentaine d'ouvrages en Tunisie au Maroc et en Syrie montre que la durée de vie moyenne est de 30 ans, mais que pour 13% d'entre eux cette durée de vie est inférieure à 10 ans et que pour 30 % elle dépasse 50 ans. Les barrages les plus rapidement envasés sont ceux des zones de montagnes marneuses à la couverture végétale peu dense. On a mesuré des érosions spécifiques à l'échelle du bassin versant de la retenue allant jusqu'à 90 t/ha/an sur le bassin du barrage de Saboune dans les collines marneuses du Rif au Maroc et de très faibles érosions sur les plateaux basaltique de la région de Homs (2.5 t/ha/an). Les mesures réalisées dans les petits barrages de l'Atlas tunisien sont intermédiaires et tournent en moyenne autour de 20 t/ha/an.

Seuls les barrages dont la durée de vie dépasse 30 ans peuvent être utilisés à des fins d'alimentation en eau potable ou à des valorisations par des périmètres irrigués. Les autres peuvent être utilisés pour des reboisements ou la mise en place d'oliveraies; les oliviers ne réclamant une irrigation que les trois premières années de plantation (Selmi & al 2000) ou comme point d'eau provisoire pour les troupeaux.

#### **Usage domestique et alimentation en eau potable (AEP)**

En Tunisie, un faible volume d'eau des lacs situés auprès des habitations est prélevé pour des fins domestiques.

En Syrie et au Maroc la croissance démographique dans les provinces à fort déficit hydrique a rendu insuffisantes les ressources en eau fournies par les sources. Ainsi les petits barrages sont équipés de pompes et de systèmes de distribution d'eau par tuyaux permettant aux camions citernes de venir s'y approvisionner pour les habitations les plus éloignées.

Dans les provinces syriennes de Swaïda, Badia et de Kalamoun, la forte croissance démographique et le coût élevé du transport de l'eau par camions citernes a conduit à construire des ouvrages de rétention d'eau sur les oueds, dès que le coefficient annuel de ruissellement atteint 5%. Ces barrages sont équipés de pompes et de systèmes de distribution d'eau par tuyaux. Des abreuvoirs sont construits pour protéger les réserves d'eau d'une pollution fécale. Bien que tous les barrages de la province aride de Swaïda aient été construits dans un objectif d'AEP, il n'en reste pas moins que le déficit en eau potable atteint encore 75% des besoins en année sèche dans cette région.

Au Maroc, dans les régions où les eaux souterraines sont inexistantes (régions de grés, ou zones de schistes dans le moyen Atlas), des petits barrages sont complètement équipés pour la fourniture d'eau potable de qualité. Ils sont alors interdits à l'exploitation agricole et aux animaux, leurs impluviums font l'objet de mesures de protection. La présence d'eau potable stimule l'activité économique. Elle stabilise les populations.

#### **L'irrigation à partir des petits barrages**

En Tunisie, sur près de 500 lacs collinaires réalisés et mobilisant près de 50 millions de mètres cubes d'eau, 400 présentent un potentiel d'irrigation. La situation de mars 1999 montre l'existence de 232 lacs collinaires équipés en groupes motopompes individuels ou collectifs et contribuant, de ce fait, au développement local. Cette situation profite à un total de plus de 1500 bénéficiaires qui exploitent l'eau soit dans un cadre individuel pour la majorité des lacs ou dans le cadre d'un comité de gestion ou d'associations d'intérêts collectifs.

Au Maroc, une cinquantaine de petits ouvrages sont mis en exploitation depuis 1985. Les conclusions d'une étude d'évaluation a posteriori du programme des petits barrages par la méthode des effets



ont montré que la part de la valeur ajoutée directe agricole et de l'élevage et qui revient aux comptes des ménages, est estimée à une moyenne de 10200 Dh/an et par ménage (El Mohamadi, 1994).

L'irrigation à partir des petits barrages est pratique courante en Syrie. L'usage de l'eau pour l'irrigation à partir de ces ouvrages est taxé par l'Etat. La taxe annuelle sur l'irrigation a été fixée en 1997 à 276 livres syriennes par dhounim<sup>1</sup> soit l'équivalent de 61\$ US par hectare.

Les périmètres irrigués autour de ce type d'ouvrages varient de quelques hectares à quelques dizaines d'hectares.

L'analyse de la diversité de fonctionnement des systèmes de production agricole autour des lacs de petits barrages tunisiens montre que (Selmi 1996) :

- 50% des exploitants n'ont pas introduit l'irrigation et conservent leur système de production traditionnel ;
- 28% commencent à intégrer le facteur eau dans leur fonction de production agricole ;
- Seulement 22%, pouvant être appelés pionniers, pratiquent la petite irrigation.

Ce taux d'exploitation des lacs collinaires est faible mais très variable d'un site à l'autre. Il tend à croître de manière importante ces dernières années. Sur le site de Kamech, dans le Cap-Bon, la retenue est équipée de 8 motopompes et fait cohabiter des périmètres de cultures industrielles (12 ha de tomates, avec un rendement moyen de 35 t.ha<sup>-1</sup>, et piments) et des jardins maraîchers traditionnels.

L'usage de l'eau permet d'introduire de nouvelles spéculations (notamment le maraîchage et l'arboriculture) très rentables dont la marge brute peut atteindre 10 fois celle de la céréaliculture traditionnelle extensive. Cette exploitation optimale de l'eau des lacs collinaires est à l'origine de la création d'un supplément de revenu annuel important qui se traduit par l'amélioration de l'habitat et une spéculation foncière sur les terres jouxtant les lacs. Apparaissent des spéculations à forte valeur ajoutée comme les pépinières de noyer dans les régions fraîches d'altitude, les écorces de racines sont utilisées à la fois dans la cosmétique traditionnelle et dans l'industrie pharmaceutique moderne (Souakine)

#### Abreuvement du bétail

Dans tous les pays, la majorité des petits barrages servent de réservoirs d'abreuvement pour les troupeaux d'ovins sédentaires ou de transhumance, pour les bovins et équidés des communautés locales.

#### La pisciculture

La pisciculture, absente en Tunisie, est développée surtout en Syrie. Les petits barrages sont empoisonnés en différentes espèces. La majorité des lacs de la région de HOMS ne s'assèchent pas. Pour au moins cette raison les retenues collinaires sont utilisées comme des sites d'élevage des poissons d'eau douce servant à l'approvisionnement de la population. La pêche au filet avec bateau est très pratiquée dans cette région. La productivité est en moyenne de 0.1 kg de poisson par mètre cube.

## IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Le fait de barrer un oued et de créer un point d'eau pérenne sur plusieurs mois, là où les crues ne passaient que pendant quelques heures, modifie fortement le milieu. Le paysage acquiert un nouveau segment : le lac collinaire qui occupe une superficie variable suivant l'importance de l'ouvrage et suivant la saison. Certains lacs vont avoir un remplissage pluriannuel, d'autres vont s'assécher pendant une période plus ou moins longue. On pourra passer d'une vue sur un plan d'eau bordé de végétation aquatique à un fond argileux sec et craquelé, jonché de végétation aquatique morte. Avec l'envasement progressif de la retenue, la période en eau se raccourcit. A un moment, le lac est remplacé par un marais temporaire.

La présence d'une quantité d'eau sur une période plus ou moins longue bouleverse l'écosystème et permet à de nouvelles flores et faunes de s'installer. Si l'on a pu constater le développement spectaculaire de batraciens, serpents, oiseaux d'eau et l'apparition d'espèces de poissons (naturellement ou par introduction volontaire), aucune étude quantitative n'a été faite. En ce qui concerne la végétation, en plus des plantes aquatiques apparaissant en bordure de la retenue, il faut noter la disparition des plantes ne supportant pas l'inondation au profit de plantes hydrophiles. De nombreuses plantations forestières sont réalisées à l'occasion de la construction du barrage, pour en fixer les berges ou en aval au profit des fuites de la digue. L'espèce la plus répandue est l'acacia fourrager qui est aussi utilisé comme plante mellifère.

---

<sup>1</sup> 1 Dhounim, unité locale de mesure de la superficie, correspond à 1000 mètres carrés soit 0.1 ha.

Près des grandes métropoles du Moyen Orient, les alentours de ces barrages en altitude sont des zones de résidence secondaire très fréquentées l'été. Les plans d'eau sont utilisés pour de nombreux loisirs : sports nautiques et plages récréatives. C'est le cas du barrage collinaire El Coran près de Damas.

Parmi les objectifs environnementaux assignés à ses petites retenues, trois ont été particulièrement étudiés par le programme HYDROMED : stocker une eau de qualité évitant les risques d'eutrophisation, protéger les infrastructures aval des crues et des sédiments qu'elles transportent, recharger les niveaux phréatiques.

### Qualité des eaux des retenues et risque d'eutrophisation

On a réalisé sur un échantillon de 25 lacs des mesures physico-chimiques des eaux (O<sub>2</sub> dissous, température, pH, conductivité électrique) et des prélèvements pour l'analyse des ions majeurs et du phosphore par campagne trimestrielle. Ponctuellement, pour quelques lacs, la structure verticale de la colonne d'eau (transparence, conductivité, température, O<sub>2</sub> dissous) est déterminée et des sédiments sont prélevés au milieu du lac pour l'analyse des formes du phosphore (Rahaingomanana, 1998).

Les différentes mesures sur le terrain et analyses au laboratoire montrent une importante variabilité de la salinité des lacs tant dans l'espace que dans le temps. En hautes eaux, la conductivité électrique varie sur les 26 lacs de 0.23 ms.cm<sup>-1</sup> à 3.58 ms.cm<sup>-1</sup> et en basses eaux de 0.31 ms.cm<sup>-1</sup> à 4.65 ms.cm<sup>-1</sup>. On observe 5 faciès géochimiques différents : sulfaté calcique, calcique sodique, bicarbonaté calcique, chloruré sodique et mixte. En règle générale, les eaux de surfaces dans ces lacs sont moins chargées que les eaux de nappe. Elles sont de bonne qualité pour l'irrigation, le tableau 3 donne les principales caractéristiques des eaux de lac collinaire en fonction de leur faciès géochimique (suivi sur 24 lacs de 1994 à 1997) :

TABLEAU 3 : Qualité des eaux de lacs collinaires en période de hautes eaux

	EC (dsm-1)	SAR	pH
Sulfate dominant	0.62 - 3.10	0.3 - 2.9	7.4 - 9.4
Bicarbonate dominant	0.16 - 0.45	0.3 - 1.0	7.6 - 8.4
Chlorure dominant	0.51 - 0.78	2.7 - 3.3	7.8

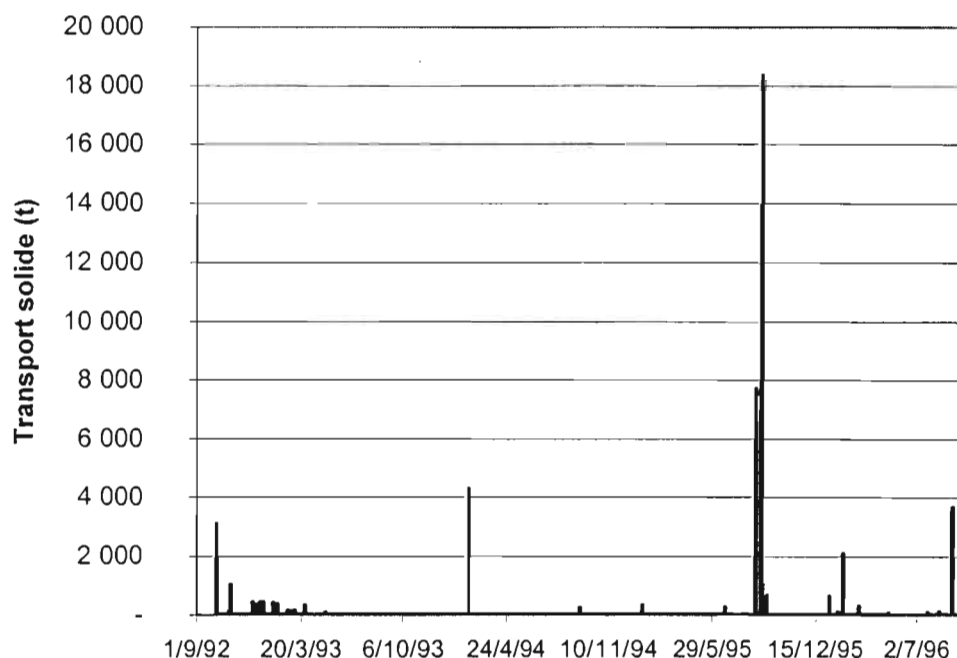
Aucun lac de construction récente ne montre de signes d'eutrophisation pour l'instant. Les études de la dynamique des ions phosphores entre le bassin, les sédiments et les eaux de lacs ne font pas apparaître d'importantes pollutions.

Des analyses biologiques ont montré une bonne qualité de ces eaux quasi potables en l'état. Les lacs proches d'agglomérations n'ont pas été échantillonnés.

### Protection des infrastructures aval

La figure 1 montre la reconstitution des pertes en sols crues par crue du 08/10/1992 au 15/08/1996 pour un barrage construit en 1989 dans une zone très sensible à l'érosion (barrage de Sadinel). Son bassin versant a une superficie de 384 ha dans une zone montagneuse sur marne et calcaire. Le poids total des sédiments exportés par le bassin versant est de 48 500 t (32 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>). 56% de ces pertes en sol sont dues aux deux seuls orages du 23/08/1995 (7 700 t, soit 20 t.ha<sup>-1</sup>) et du 04/09/1995 (18 300, soit 48 t.ha<sup>-1</sup>). Le lac collinaire a piégé 90% du transport solide total et est aujourd'hui pratiquement complètement colmaté.

A la fin de l'année hydrologique 1998-1999, les 24 unités "lacs collinaires", bien suivies par des mesures d'envasement depuis 1993, qui avaient une capacité initiale totale de stockage de 2 634 000 m<sup>3</sup>, ont perdu 580 200 m<sup>3</sup>, soit 22%. Avec une durée d'existence moyenne de 7.7 années la perte moyenne de la capacité de stockage est de 4.6 % de par an. Suivant les sites, l'importance de l'envasement est très variable. Pour comparer l'envasement des différentes retenues, on a rapporté sa perte de volume à l'unité de surface de son bassin et à l'année. Cette grandeur exprimée en m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> varie de 1.2 à 24, sa moyenne est de 10 et son écart-type de 6.



*Fig. 1 : Transport solide crue par crue sur le bassin de Sadine 1*

En extrapolant le volume moyen de vase piégée par ces 27 unités aux 1000 prévues, on obtiendrait un volume de vase piégée de  $3.8 \text{ M m}^3.\text{an}^{-1}$ . Ce chiffre est à comparer aux sédiments apportés aux grands barrages de Tunisie qui est de  $25 \text{ M m}^3.\text{an}^{-1}$ .

### **Recharge des nappes superficielles**

L'étude des quantités d'eau apportées à la nappe combine des observations de géochimie (isotopes et éléments trace) à des observations hydrodynamiques comprenant un suivi fin de la bathymétrie du lac, de la piézométrie en aval et une bonne caractérisation de la nappe alluviale (géométrie et paramètres hydrologiques par pompages d'essai). Ces études sont en cours sur trois retenues tunisiennes; elles attestent d'une recharge non négligeable à partir des zones de marnage des barrages (Grunberger et al, 1998, Nasri et Albergel 1997).

Des suivis à partir d'installations plus légères (limnigraphe, pluviographe et bac à évaporation) sont réalisés sur 30 lacs de barrages où il est possible de faire un bilan hydrologique à l'échelle journalière bouclé sur les échanges d'eau avec le souterrain (volume positif = un apport de la nappe vers lac, volume négatif = une infiltration)

Le calcul des volumes infiltrés au courant de cette même année montre une recharge effective des nappes alluviales pour 14 unités sur 26. Des puits de surface, en aval de la retenue ont vu leur niveau d'eau s'élever de plus de 20 m. C'est le cas du lac d'El Gouazine, au pied du Jebel Serj en Tunisie où le niveau de l'eau dans deux puits, en aval de la retenue, a remonté d'environ 10 m depuis la construction du barrage en 1990. Le calcul du volume infiltré pour l'année 1995-1996 a donné une valeur de  $275\,000 \text{ m}^3$  (125 % du volume de la retenue) et pour une année plus faible 1998 - 1999 :  $135\,000 \text{ m}^3$ . La remontée de la nappe a été de 2m pour la période automnale 1995.

Ces remontées d'eau s'accompagnent parfois d'une détérioration de la qualité chimique de l'eau. Dans le cas d'El Gouazine, la concentration en substances dissoutes est de  $2 \text{ g.l}^{-1}$  dans le lac et de  $3.5 \text{ g.l}^{-1}$  dans les puits.

### **DISPONIBILITE DE L'EAU ET GESTION D'UNE RETENUE**

La figure 2 montre le bilan hydrologique mensuelle de la retenue de Syndiané en Syrie durant l'année calendaire 1998. On remarque de fortes crues en Janvier, Février et Mars qui ont bien rempli le réservoir. Les apports par crue ont été de  $500.000 \text{ m}^3$  en Janvier. Ces fortes crues ont rempli le barrage qui a déversé quatre mois durant. Les apports directs par les précipitation (hauteur de la pluie x surface de la retenue) sont faibles.

Les utilisations de l'eau (volume prélevé par la vanne de fonds) sont plus faibles que les pertes par évaporation, sauf en juillet, août septembre où ils sont du même ordre de grandeur.

Le bilan hydrologique est bouclé positivement en Mars et Avril et négativement les autres mois de l'année. On interprète ce résultat de la manière suivante. Après les grandes pluies de Janvier et Février, la nappe d'eau détenue dans les sols, a un niveau piézométrique supérieur à la cote du lac et vient l'alimenter. Après la baisse de ce niveau de nappe, les pertes par infiltration du lac vers les nappes superficielles sont fonctions de la charge hydraulique et de la perméabilité du fond du lac. Le fond du lac est plus perméable dans la zone de marnage que dans le fond qui récupère des sédiments fins de colmatage.

En fonction du volume d'eau stocké en fin de saison pluvieuse il serait intéressant de faire des lâchers pour recharger la nappe en fonction de ses capacités de stockage et des besoins en eau pendant la saison sèche.

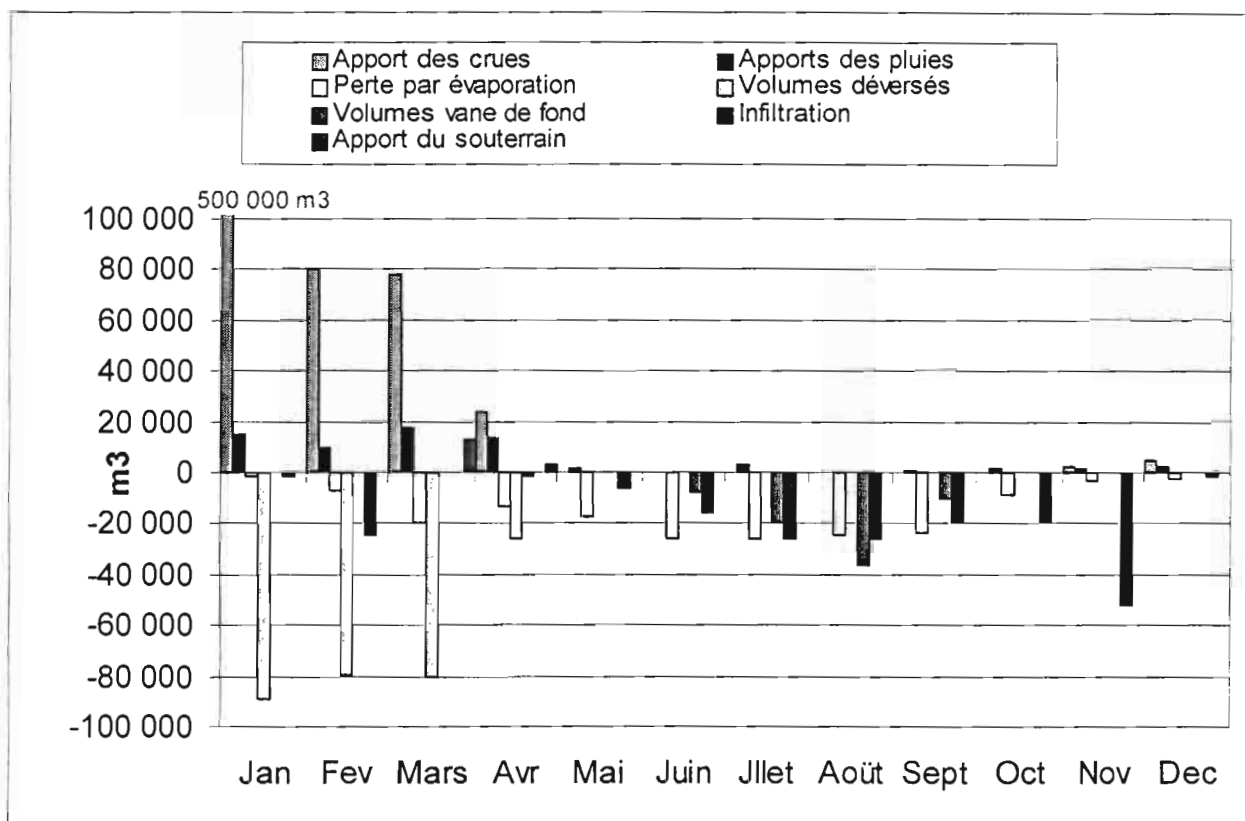


Fig. 2 : Bilan hydrologique mensuel du barrage collinaire de Syndiané (Syrie)

## CONCLUSION

Implantés dans des environnements fragiles et à faible activité économique, ces petits barrages sont perçus comme une ressource supplémentaire, vitale mais incertaine. Le choix des sites d'implantation et la gestion des retenues doivent être en rapport avec des objectifs précis d'ordre conservatoire ou délibérément orientés vers le développement rural.

Ainsi on voit se profiler les deux grands types de lacs collinaires :

Ceux qui répondent à la présence de risques particuliers dans le milieu, risques naturels d'ordre physique peu maîtrisables par la seule population locale et surtout peu susceptibles, une fois contrôlée, de modifier rapidement l'état économique local. Ces ouvrages ne peuvent relever que de la responsabilité pleine et entière d'un service de l'État.

Ceux qui sont en situation de potentialité évidente avec bonne garantie de ressources en eau et en terres et surtout potentiel humain, motivé, innovateur, compétent même si un apprentissage est nécessaire et en définitive apte à assumer très vite un transfert de responsabilité à son profit.

Les retenues d'eau peuvent être gérées de manière rationnelle avec un suivi hydrologique simple. L'objectif de cette gestion doit être de minimiser les pertes par évaporation.

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL J. & CLAUDE J. (1997) : Small dams in the dry Mediterranean area : Stakes, constraints and prospects. In Water in the Mediterranean. Collaborative Euro-Mediterranean Research : State of the art, results and future priorities. Istanbul, 25-29 Nov. 1997.
- ALBERGEL J. & JOB J.L (1996): HYDROMED : Programme de recherche sur les lacs collinaires du pourtour méditerranéen. Proposition. 4<sup>ème</sup> PCRD INCO DC
- ALBERGEL J. & REJEB N. (1997) : Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. CR. Acad. Agric. Fr., 1997, pp. 77-88. Séance du 19 Mars 1997. Note présentée par J. ALBERGEL. Discussion pp. 101-104.
- BEN YOUNES O.C. (1985) La gestion des retenues : les lacs collinaires au Maroc. Ouvrage d'irrigation. Retenues collinaires (Sophia Antipolis). 13 Fev. 5 Mars 1985
- BOUFAROUA M., ALBERGEL J., PEPIN Y. (2000) Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la dorsale Tunisienne. Vth International Conference on the Geology of the Arab World (GAW - 5) Le Caire 21 - 24 Février 2000
- DARVES-BORNOZ R & CLEMENT, (1957) Les barrages collinaires en Italie. Rapport de mission BTGR n°36.
- EL AMAMI S. (1983) Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie. Centre de Recherche de Génie Rural, Tunis.
- EL. MOHAMADI N (1994) Gestion et impact des petits barrages sur l'environnement. Cas du Maroc. In Petits Barrages. Actes des Journées nationales d'Etudes. AFEID et CFGB, Bordeaux 2-3 Février 1993. pp 391-403
- GRUNBERGER O., MONTOROI J. P., NASRI S., ALBERGEL J., PEPIN Y., RAHAINGOMANA N. (1998) : Water chemistry of a small reservoir catchments in Central Tunisia. In Séminaire International : Rain Water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas. Lund, 29 June - 4 July 1998.
- KARA DAMOUR S. & MISKI A. F. (1997) : Small dams and hill reservoirs in Syria. ACSAD.
- NASRI S., ALBERGEL J. (1997) : Hydrological Survey on hill reservoirs in the semi-arid Tunisia. In Water in the Mediterranean. Collaborative Euro-Mediterranean Research : State of the art, results and future priorities. Istanbul, 25-29 Nov. 1997.
- RAHAINGOMANANA N. (1998) : Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore. Thèse de doctorat en Hydrologie, Université Montpellier I, 311 p.
- SELMi S. (1996) Interventions de l'état en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien. Thèse de doctorat. Montpellier. ENSAM., 400p.
- SELMi S., SAI M.B., HAMMAMI M. (en preparation) Le développement de l'olivier autour des lacs collinaires : une valorisation d'une ressource aléatoire et non pérenne
- TALINEAU JC, SELMI S. & ALAYA K. (1994) Lacs collinaires en Tunisie Semi Aride. Sécheresse. Note Originale N°4, Vol 5 pp 251-256

# ENVIRONNEMENT INSTITUTIONNEL ET REALITES PHYSIQUES POUR UNE GESTION INTEGREE DE L'EAU DANS LE MILIEU SEMI-ARIDE MEDITERRANEEN. LE CAS TUNISIEN.

Bachta M. S.\*, Le Goulven P.\*\*\*, Le Grusse Ph.\*\*\*, Luc Jean-Paul\*\*

\* *Institut National Agronomique de Tunisie, 43 Avenue Charles Nicolle, 1082 Tunis Mahrajène, Tunisie*

\*\* *Institut de Recherche pour le Développement, BP 434, 1004 Tunis El Menzah IV, Tunisie*

\*\*\* *CIHEAM - Institut Agronomique Méditerranéen, 3191 route de Mende, 34093 Montpellier*

## RESUME

Les sociétés hydrauliques du pourtour méditerranéen ont connu d'importantes transformations de nature technique. Celles-ci ont rendu anachroniques les institutions locales en charge de la gestion des équipements en place et de la distribution de l'eau. Des règles de gestion de la ressource sont à concevoir et à mettre en œuvre. Ces règles devront être compatibles avec le désengagement de l'Etat et l'amélioration des performances productives des périmètres irrigués. Le présent papier est un essai d'appréciation de la faisabilité sociale de cette mise en œuvre.

## MOTS CLES

Gestion intégrée de l'eau, demande en eau, irrigation, institutions

## INTRODUCTION

Dans les régions semi-arides méditerranéennes, les écoulements se produisent de façon sporadique par des événements brefs dans lesquels transitent des volumes importants avec des vitesses élevées. Pour les réguler et les exploiter, les sociétés rurales ont développé depuis toujours des petits ouvrages techniques fiabilisés par l'expérience, mais aussi par des règles d'accès à la ressource et des institutions locales pour les faire respecter.

Avec l'apparition des "espaces nations", les pouvoirs publics, à travers des instances centralisées, ont pris en charge la gestion de la ressource en construisant toute une série d'aménagements plus importants pour mobiliser, transférer et allouer la ressource en eau en fonction de choix stratégiques multiples, évolutifs et raisonnés sur des équilibres nationaux. En outre, ces nouveaux aménagements ont permis l'émergence de sociétés d'irriguants sans tradition technique ni organisationnelle dans la gestion de l'eau.

Pour atteindre les objectifs arrêtés, une organisation législative, réglementaire et institutionnelle a été conçue autour d'ouvrages complexes, interconnectés, où réserves superficielles et souterraines sont souvent liées, et raisonnés dans l'espace dans une stratégie d'aménagement du territoire.

Cette phase de mobilisation a largement contribué au développement économique, mais actuellement les demandes suscitées dépassent parfois les volumes exploitables : la maîtrise de la demande en eau est devenue une priorité, principalement celle destinée aux usages agricoles largement majoritaires.

La gestion de l'eau ne se cantonne plus à la ressource et l'ensemble du cadre national de gestion est en pleine évolution pour prendre en compte les contraintes et les dynamiques amont/aval afin de définir la nature et les échelles de ses interventions. La recherche scientifique doit accompagner cette évolution pour déterminer les actions pertinentes pour revenir à une gestion intégrée et durable de l'eau. Un cadre général de réflexion distinguant les principales étapes de la démarche à proposer est présenté dans la dernière section de ce papier. La deuxième et la troisième sections sont réservées respectivement à un aperçu de l'évolution des sociétés hydrauliques et un essai d'appréciation du bilan des politiques antérieures.

## ANALYSE DIACHRONIQUE DES POLITIQUES DE L'EAU

### Une maîtrise de l'eau ancienne autour d'aménagements locaux

Les techniques inventoriées par différents auteurs depuis l'époque romaine (Bouderbala & al, 1984 ; El Amami, 1984) sont très diverses, à l'image d'un milieu contrasté : banquettes (tabias) pour retenir localement

eaux et sédiments pour l'agriculture ; terrasses de cultures pour limiter le ruissellement ; ouvrages dans les oueds pour diminuer les vitesses d'écoulement (jessours) ; retenues collinaires pour le stockage de l'eau en été ; canaux de dérivation et d'épandage des crues (Mgoud) ; impluvium (meskat) avec ruissellement maîtrisé et dirigé ; captages d'eau souterraine avec maîtrise technique de la distribution par séguias.

Ces ouvrages sont disposés sur le bassin selon une organisation spatiale qui permet d'adapter chaque type d'aménagement aux contraintes de la zone, chacun contribuant à l'équilibre écologique global par ses effets annexes : favoriser l'infiltration, limiter l'érosion et restaurer les sols.

Le caractère rudimentaire des ouvrages était compensé par une gestion sociale de l'eau très poussée (Berque, 1955), basée sur la *séguia* qui servait de canal de répartition, transport et de distribution et régulée par des droits savants ou coutumiers très précis. La même société décidait de l'emplacement des ouvrages, de leurs caractéristiques de construction, de leur entretien et de leur exploitation.

L'accès à l'eau structurait ces sociétés rurales en groupes de propriétaires (eau et terre) et d'ayants-droit sans propriété le plus souvent marginalisés par rapport aux processus de décision, ces derniers fournissant le travail pour la construction, l'entretien et la gestion technique des aménagements. La cohabitation de ces deux groupes sociaux était définie par un ensemble de règles se rapportant à la propriété de l'eau, à sa distribution et à l'entretien des ouvrages. Elles étaient acceptées par tous et précisaient les statuts et les rôles de chacun.

Même si, l'eau restait souvent l'ami du puissant (Bedoucha, 1987), il y avait totale cohérence entre outils techniques et objectifs de gestion ce qui assurait une bonne performance globale du système.

### **Un déséquilibre progressif entre sociétés hydrauliques et outils techniques**

Ces formations sociales en équilibre avec leurs milieux physiques se sont peu à peu transformées. La généralisation de la scolarisation a rendu anachronique l'ordre social prévalant dans ces sociétés, les jeunes scolarisés n'ont que rarement accepté le retour aux travaux agricoles. L'essor démographique a provoqué de fortes pressions sur les ressources naturelles et des partages successifs de celles-ci qui ont entraîné des stratégies d'intensification et d'extension de l'assiette foncière par le défrichement avec pour conséquence une dégradation des ressources.

Les sociétés rurales ont également subi dans leur histoire des chocs externes (apparition de nouveaux besoins urbains croissants, peuplement d'espaces agricoles par des colons), souvent accompagnés d'innovations technologiques brusques dans la mobilisation des ressources hydriques (forages, barrages remplaçant des techniques de piégeage et d'épandage) ou dans la production agricole (mécanisation, intensification). Ces innovations sont restées le plus souvent l'apanage de certaines classes des sociétés rurales, d'où le concept d'une agriculture duale avec des changements notables dans les rapports sociaux de propriété et de production régissant l'accès aux ressources mais aussi leur exploitation à des fins productives.

Les sociétés rurales se sont trouvées confrontées à une dynamique touchant leur reproductibilité. Les tentatives d'adaptation de ses sociétés à leurs nouveaux contextes (refus de la " modernité " ou essais de son assimilation) se sont soldées, dans leur ensemble, par des échecs cuisants. Ces difficultés marquent la fin du modèle social basé sur un accès à la ressource en eau régi par des règles conçues et observées dans le cadre d'institutions locales.

### **La mise en place de la Grande Hydraulique**

Avec l'émergence des "espaces nations", les pouvoirs publics, à travers des instances centralisées, ont pris en charge la gestion de la ressource en construisant toute une série d'aménagements importants pour mobiliser, transférer et allouer la ressource en eau en fonction de choix stratégiques multiples, évolutifs et raisonnés sur des équilibres nationaux. Cette intervention de l'état est décalée dans le temps selon les pays mais elle peut cependant s'esquisser en 3 grandes phases (Feuillette & al, 1998) :

#### **- la phase d'investissement technique,**

La construction des grands ouvrages obéit à une logique de meilleure répartition de la ressource entre régions et/ou à des valorisations multiples qui doivent accélérer le développement des pays. En Tunisie, la première série de grands barrages construits est destinée à augmenter la production agricole de la région nord considérée comme le grenier du pays, puis à transférer les surplus vers les régions côtières pour alimenter les grands centres de population, l'industrie touristique et les zones d'irrigation à haute valeur ajoutée.

Cette phase de construction délaisse complètement les retenues collinaires et autres petits ouvrages précédents.



- **la phase d'accompagnement légal et structurel,**

En parallèle, les pouvoirs publics mettent en place des cadres législatifs et réglementaires d'accompagnement (Codes des eaux) qui transforment le statut juridique de la ressource en eau (public inaliénable et imprescriptible), établissent des nouveaux droits d'usages sans toujours tenir compte des droits anciens et confient la responsabilité de leur application au Ministère de l'Agriculture.

Des institutions centralisées sont créées pour appliquer au niveau régional les stratégies définies au niveau national : Directions Générales (ressources en eau, grands travaux hydrauliques, génie rural), Offices régionaux de mise en valeur, société nationale (SONEDE) pour l'AEP.

L'investissement en infrastructures hydrauliques s'accompagne d'une politique d'incitation à l'intensification des prélèvements, proposant aux utilisateurs un accès facile et bon marché à la ressource. Les objectifs prioritaires de ces mesures sont : assurer l'AEP à tous les habitants, stabiliser les revenus ruraux pour lutter contre l'exode rural, assurer la sécurité alimentaire du pays, développer l'agriculture d'exportation et principalement des agrumes, développer le tourisme.

- **la période des économies,**

La mobilisation des ressources se poursuit mais les sites favorables à la construction des grands barrages sont déjà installés et le coût de construction des nouveaux ouvrages devient plus élevé. Les pouvoirs publics ralentissent leurs politiques de mobilisation, renforcent leurs gestions réglementaires (interdiction, recouvrement des coûts) et techniques (connexions entre ouvrages, barrages à usage multiples, logiciels de simulation et d'optimisation). Il s'agit de satisfaire au mieux des demandes plus nombreuses et très diversifiées, mais il n'est pas encore question de remettre en cause l'utilisation qui est faite de la ressource.

Le relèvement des taux de recouvrement est l'objectif principal assigné aux Offices assurant la gestion des Périmètres Publics Irrigués. Les difficultés rencontrées à ce niveau sont à l'origine de la suppression pure et simple des Offices eux-mêmes (1986), qui sont remplacées par des institutions locales (AIC) et régionales (CRDA) dont les attributions sont fixées ou repensées par des compléments au Code des Eaux en 1987.

Les AIC (Association d'Intérêt Collectif) sont dotées de la personnalité juridique et créées à l'initiative des usagers ou de l'administration. Un contrat de gérance d'une durée de trois ans doit être signé entre l'administration et chaque AIC. Les dépenses de l'AIC couvrent les frais de fonctionnement et de maintenance des équipements de captage et de distribution de l'eau potable ou d'irrigation, dont la gestion leur est déléguée, les recettes proviennent des cotisations des adhérents, des subventions du CRDA et de la vente d'eau.

Le CRDA (Commissariat Régional pour le Développement Agricole) est une structure fortifiée par la loi de 1989 sur la décentralisation, dont l'espace de compétence est le gouvernorat. C'est une structure pluridisciplinaire et intégrée qui contient des unités thématiques (arrondissements) représentant la plupart des Directions Générales nationales. Seuls les grands travaux hydrauliques et la SONEDE échappent en partie à cette tutelle régionale.

L'encadrement des AIC est une des missions du Commissariat qui reçoit les recouvrements des droits d'usage de l'eau, dont la tarification est établie au niveau national. L'arrondissement des Ressources en Eau est chargé du respect des règlements : c'est une police des eaux assermentée qui dresse des procès verbaux et les transmet au commissaire pour traitement par une juridiction civile.

**Période d'ajustement en vue des pénuries annoncées**

Si les prévisions situent la rupture offre/demande globale vers 2010, des pénuries locales ont déjà été vécues lors d'années sèches. Différentes études ont été lancées (Economie de l'eau 2000, stratégie du secteur de l'eau, ...) pour concevoir l'exploitation rationnelle et durable des ressources naturelles (eau, sol principalement).

La Tunisie s'est donc engagée dans le contrôle de la demande au moyen d'outils technico-économiques encadrés et soutenus par des mesures réglementaires et institutionnelles ainsi que dans des mesures techniques complémentaires :

• **Politique de tarification,**

L'eau agricole a doublé entre 1989 et 1996 (de 30 à 60 millimes), et le tarif de l'eau potable est désormais calculé par tranches de consommation, celles des hôtels étant systématiquement facturés sur le tarif le plus fort.



- **Incitations à l'économie d'eau,**

Des lois et des décrets sont mis en place pour inciter les agriculteurs à économiser l'eau : les équipements de micro-irrigation et les conduites de distribution sont subventionnés jusqu'à hauteur de 60 %. L'Etat procède également à la réhabilitation des réseaux de distribution dans les périmètres collectifs

- **Le renforcement de la gestion collective,**

Les Associations d'Intérêt Collectif (AIC) sont transformées en Groupements d'Intérêt Collectif (GIC) aux possibilités étendues. Les GIC constituent la structure de base sur laquelle les pouvoirs publics comptent s'appuyer pour accélérer leur désengagement financier et contrôler les prélèvements. Par effet de balancier, la plupart des Directions Générales perdent de leur importance opérationnelle mais gardent leur rôle d'encadrement et de coordination dans leurs secteurs respectifs.

- **Petite et moyenne hydraulique de complément,**

La législation sur la Conservation des Eaux et des Sols (loi de juillet 1995) définit les types de travaux de Conservation des Eaux et des Sols (CES) : tabias et banquettes végétales sur le haut des versants pour lutter contre l'érosion en diminuant les vitesses de ruissellement et augmenter l'infiltration dans la zone aérée ; lacs collinaires à courte durée de vie et sans possibilité de gestion technique (1000 prévus, plus de 400 construits) ; barrages collinaires plus importants avec possibilité de connexions (203 prévus, plus de 100 achevés) ; ouvrages de recharge et d'épandage pour diriger les écoulements de surface vers les nappes phréatiques et la zone aérée du sol.

Ces petits aménagements étagés le long des bassins versants proposent une meilleure répartition de la ressource en eau sur le bassin, augmentent la capacité de stockage en utilisant les réservoirs souterrains (diminution de l'évaporation), ralentissent les phénomènes d'érosion et protègent les grands ouvrages en stockant une partie des sédiments transportés. En revanche, ils peuvent diminuer les écoulements parvenant aux grands barrages. La gestion d'un bassin versant devient plus complexe, puisqu'elle doit intégrer un ensemble d'aménagements superposés.

## **LE BILAN DES POLITIQUES ANTERIEURES**

A la fin de ce siècle, les Pouvoirs Publics tunisiens ont procédé au bilan des politiques antérieures concernant la gestion de l'eau au niveau national, afin de déterminer les aspects essentiels qu'il faudra développer pour assurer une gestion durable des ressources en eau ( Etude du secteur de l'eau par BECHTEL International / SCET Tunisie. De ces volumineux rapports se dégagent quelques grandes conclusions.

### **Durabilité environnementale**

Etabli par Khanfir R. & al en 1996, le rapport Eau 21 sur la stratégie de l'eau en Tunisie à long terme (2030) montre différentes facettes des bilans globaux offre/demande. Cette étude tient compte d'un certain nombre d'analyses préliminaires ou en cours d'achèvement : Etude économie de l'eau 2000 (DGETH, 1990-1995), Etude sur la stratégie des ressources naturelles (Ministère de l'Agriculture, 1997), Etude du secteur de l'eau (1997-2000), Stratégie décennale de mobilisation des ressources en eau (1991-2000).

Pour établir les projections des bilans ressources/demandes, plusieurs paramètres sont utilisés en se basant sur les objectifs fixés par l'Etat :

- l'évolution du volume d'eau mobilisé est déduite du programme de stratégie précédant et des projets prévus pour la sauvegarde des ressources mobilisées : surélévation des barrages, constructions des barrages de seconde génération, recharge de nappes et poursuite des travaux de CES.
- Les paramètres utilisés pour calculer l'évolution de la demande en eau en agriculture sont essentiellement l'efficacité des réseaux, la consommation à l'hectare et la tarification.

L'évolution de ces paramètres doit respecter les objectifs fixés par l'Etat, c'est à dire atteindre un taux d'efficacité global de 90%, baisser la consommation à l'hectare au minimum nécessaire et appliquer une tarification optimale.

A partir de ces hypothèses, un premier bilan est réalisé pour l'année 1996 :

Ressources / Demandes 1996	Volumes en Mm3			Besoins en Mm3				
	Potentiel	Mobilisé	Exploitable	AEP	Agricoles	Industrie	Tourisme	Total
Eaux conventionnelles	4670	3122	<b>2647</b>	290	2090	104	19	2503
Eaux non conventionnelles	250	120	120	0	25	0	0	25
Total	4920	3242	<b>2767</b>	290	2115	104	19	<b>2528</b>

L'année 1996 a une pluviométrie plus importante que la moyenne inter annuelle du pays mais elle est précédée par 2 années de sécheresse qui ont eu des répercussions sur les stocks d'eau disponibles. Le bilan offre/demande est positif même avec les seules eaux conventionnelles.

L'eau allouée aux usages agricoles alimente 335000 ha et représente 83% des prélèvements : 128000 ha par les eaux de surface (4500 m3/ha/an), 130000 ha par puits de surface (6000 m3/ha/an), 67000 ha à partir de forages (11500 m3/ha/an), 7000 ha par eaux usées (4000 m3/ha/an).

Il faut attendre 2030 pour voir le bilan offre/demande s'inverser sur les ressources conventionnelles :

Ressources / Demandes 2030	Volumes en Mm3			Besoins en Mm3				
	Potentiel	Mobilisé	Exploitable	AEP	Agricoles	Industrie	Tourisme	Total
Eaux conventionnelles	4670	3770	<b>2732</b>	451	1895	203	35	2574
Eaux non conventionnelles	440	389	389	40	140	0	6	186
Total	5110	4159	<b>3121</b>	491	2035	203	41	<b>2760</b>

Le constat est rassurant, mais le même rapport constate que sur les 204 nappes phréatiques répertoriées qui représentent un stock estimé de 720 Mm3, 75 sont en surexploitation, le volume total de surexploitation atteignant 164 Mm3/an. Les taux de surexploitations sont parfois élevés et touchent des nappes très importantes.

Cette constatation relativise énormément les bilans précédents. L'exploitation des nappes phréatiques est en grande majorité menée par des puits individuels dont le nombre est difficilement contrôlable. D'autre part les agriculteurs ont développé des techniques de sondages à bras qui sont installés au fonds des puits et permettent d'augmenter les volumes soutirés. Enfin, le prix des pompes (motopompes ou électropompes) a beaucoup baissé et de nombreux agriculteurs ont augmenté la puissance de leurs équipements. Il est donc logique que les volumes d'exhaure par puits individuels soient largement sous-estimés.

Les bilans prévisionnels 2010, 2020 et 2030 sont fondés sur l'hypothèse que les consommations en eau agricole vont s'abaisser en tenant compte des objectifs prévus d'économie d'eau : les divers travaux de terrain montrent une toute autre réalité. Des subventions sont prévues pour les agriculteurs qui s'équipent en goutte à goutte dans le cadre de cette politique d'économie d'eau.

Or un exploitant privé sur puits ou forage va profiter de cette modernisation, non pas pour diminuer ses prélèvements, mais pour augmenter sa surface irriguée. L'Etat obtiendra une meilleure valorisation économique de l'eau mais pas une diminution de la tension sur la ressource.

On peut donc conclure que la Tunisie a déjà un bilan offre/ consommation négatif dû à la surexploitation des nappes phréatiques et que cette surexploitation ne va pas diminuer car les irriguants privés qui se servent dans ces réservoirs sont difficilement contrôlables, ont accès à du matériel de plus en plus performant et de moins en moins cher et sont habitués à un accès à l'eau sans contrainte.

### Irrigation et finances publiques

En 1997, les superficies irriguées représentent 6% de la SAU totale et contribuent pour 1/3 à la valeur totale de la production agricole annuelle estimée à 2.5 milliards de dinars. Elles ont augmenté de 90% en l'espace de 15 ans. Cet accroissement est essentiellement la conséquence d'une politique d'extension des périmètres publics (plus 340%).

Année	Périmètres irrigués en ha			% Privés
	Publics	Privés	Total	
1980	40130	135870	17600	77.2
1985	67610	126360	193970	65.1
1990	93800	161500	255300	63.3
1995	176725	157379	334104	47.1
% variation	340.4 %	15.8 %	89.8 %	

Source : Ministère de l'agriculture : Etude du secteur de l'eau, Grp: Bechtel Int/SCET Tunisie , Août 1998

La production agricole en irrigué notamment celles des productions d'agrumes, du maraîchage et du lait n'a fait que doubler durant la même période (Jouve, 1998) ; les rendements en irrigué sont donc restés constants. Ces constatations sont confirmées par les résultats de l'évaluation faite par la Banque Mondiale sur les projets d'irrigation de la Tunisie Centrale, la tomate constitue une exception à ce constat (Banque Mondiale, 1995).

On en déduit que l'augmentation de la production agricole irriguée est avant tout le fait d'une politique d'extension des périmètres irrigués plutôt que d'une politique d'intensification des zones déjà aménagées. Or cette politique d'extension à un coût de plus en plus élevé.

Pour l'estimer, il est possible d'utiliser les chiffres du IX<sup>ème</sup> plan en cours qui prévoit un investissement de 500 M DT pour la création de 60 000 ha de périmètres irrigués d'ici 2005. Ces données permettent de calculer un prix de revient de l'eau rendue bord de parcelle sur la base du volume total mobilisable sur 30 ans, et d'un taux d'actualisation de 7%.

Prix de revient total du m <sup>3</sup> d'eau rendu bord de parcelle : mobilisation, transport, distribution et exploitation	0,422 dinar / m <sup>3</sup>
Prix d'aménagement du périmètre	0,280 dinar / m <sup>3</sup>
Charges d'exploitation et de maintenance	0,065 dinar / m <sup>3</sup>
Prix moyen facturé en périmètre public	0,010 dinar / m <sup>3</sup>

La construction de nouveaux périmètres irrigués a donc un coût non négligeable pour l'Etat que celui-ci cherche à réduire en confiant les charges d'exploitation et de maintenance des périmètres aux structures de gestion collective.

La charge de l'Etat est supérieure si l'on inclut les frais de fonctionnement des institutions régionales et nationales chargées de concevoir, suivre et gérer l'ensemble des périmètres publics, les subventions accordées pour les économies d'eau, ....

A titre d'exemple, dans le cadre du projet Bou Heurtma (18 000 ha dans le gouvernorat de Jendouba), pour un investissement de 55 M DT, le poste "vulgarisation" a représenté 3,8 M DT, soit 7 % soit la moitié des charges d'exploitations calculées sur 30 ans.

Pour les subventions accordées sur du matériel de micro-irrigation, leur coût peut atteindre 0,214 DT au m<sup>3</sup> en raisonnant sur des cas concrets et une subvention de 60%. Dans la pratique, on constate que les agriculteurs qui utilisent ces équipements en profitent pour augmenter leurs surfaces irriguées à volume total prélevé constant ou même supérieur à cause du confort généré par ces techniques.

Dans ces conditions, l'Etat met à disposition des agriculteurs une eau dont le prix peut atteindre 0,636 DT/m<sup>3</sup>, mais d'un autre côté, le passage au goutte à goutte incite les agriculteurs à améliorer leur technicité rapidement, évolution qui serait plus lente en restant sur des techniques traditionnelles.

L'augmentation des productions agricoles irriguées est essentielle pour le pays, mais la politique d'extension des périmètres associée aux subventions d'économie est une solution onéreuse pour le budget de l'Etat, et difficilement viable à long terme. La réduction des dépenses passe par un désengagement progressif déjà entamé assorti d'incitations fortes à une meilleure valorisation économique de l'eau : intensification, cultures à revenu élevé,...

## Le fonctionnement des structures de gestion collective

Les Associations d'Intérêt Collectif (AIC) transformées en Groupements (GIC) sont les structures sur lesquelles l'Etat compte s'appuyer pour réduire ses dépenses, maîtriser les consommations en eau agricole et améliorer la valorisation économique de l'eau. On note un certain engouement des irriguants en périmètres publics vis à vis de ces structures, surtout dans le gouvernorat de Nabeul.

La situation des AIC d'irrigation ou AIC/PI a fait l'objet d'analyses nationales à travers des visites dans les différents gouvernorats et d'enquêtes complémentaires. Les résultats ne sont pas toujours concordants et reflètent une réelle difficulté d'obtention de données. Les analyses réalisées dans le gouvernorat de Kairouan (EUREKA / BTE, 1999) donnent une idée générale de leur fonctionnement.

Type AIC	en service	fonctionnelles	% fonctionnelles	contrat gérance
AIC AEP	193	146	76%	
AIC Irrigation	43	21	49%	1
Total	236	167	71%	

Ces chiffres reflètent une certaine difficulté de mise en place, explicitée en fonction du type de difficultés rencontrées sur cet échantillon toutefois réduit.

Difficultés principales de fonctionnement des AIC de Kairouan, par type et % d'AIC concernées	
<b>Sociales</b>	Manque de formation des Conseils d'Administration (45%) Conflits entre Conseils d'Administration et bénéficiaires (29%)
<b>Financières</b>	Absence de comptabilité (48%) Mode de collecte non approprié (33%)
<b>Techniques</b>	Systèmes de distribution (76%) Pression insuffisante (38%)
<b>Mise en valeur</b>	Faibles traditions en irrigation (86%) Accès au crédit bancaire (62%)

La majeure partie des difficultés portent sur des problèmes d'organisation, de compétence, de rôles respectifs Etat /AIC/ Bénéficiaires, bref sur une gestion sociale qui a du mal à s'organiser.

Les AIC sont un peu le retour au schéma historique de petits aménagements (lacs et barrages collinaires, forages) et d'usages agricoles de proximité, avec une gestion collective que l'on voudrait forte et autonome, mais les conditions ne sont plus les mêmes.

D'une part, il y a une plus grande fiabilité dans la construction des ouvrages et une diversité technique accessible pour partager, transporter et appliquer l'eau à la parcelle ; cette technicité actuelle plaide pour de meilleures performances.

Par contre, la construction des infrastructures (emplacement et caractéristiques) et l'organisation sociale sont imposées par les pouvoirs publics à des populations qui ont perdu grande partie de leur savoir-faire hydraulique ou, qui n'en ont jamais eu pour les cas des nouveaux périmètres irrigués. Il n'y a plus de cohérence d'ensemble, ce qui explique les difficultés de mise en place de cette phase de décentralisation que l'on veut rapide et peu onéreuse.

Force est de constater que de telles transitions sont en général d'une faisabilité problématique. Les exigences de la mise en œuvre d'une gestion collective de l'eau d'irrigation sont ci-après développées.

## UNE RECHERCHE D'ACCOMPAGNEMENT POUR UN DESENGAGEMENT PROGRESSIF

### Un cadrage théorique du problème de la gestion intégrée

Les premiers travaux théoriques ayant abordés la question de la gestion collective (Arrow, 1974 ) et (Sen, 1970 ) ont mis en évidence l'impossibilité de ces choix et le conflit : efficacité parétienne et liberté individuelle qu' ils engendrent. Autrement dit, des choix collectifs respectueux de la libre initiative individuelle sont d'une réalisation impossible et conduisent à des états de la société non Pareto optimal. Des développements ultérieurs aux travaux d'Arrow et de Sen concluent pour la possibilité d'éviter de tels

conflits (Généreux, 1995 ). Il est démontré que la distinction entre les stades constitutionnels primaire et secondaire rend compatible le respect des libertés individuelles et de l'optimalité parétienne des choix collectifs réalisés. Au cours du stade primaire, les domaines des choix individuels, du libre échange individuel et volontaire d'une part, les objets pour lesquels des procédures de décision publique d'autre part, sont clairement définis et acceptés. La définition des règles de décision s'appliquant aux choix publics constitue le contenu du deuxième stade constitutionnel.

En pratique, les domaines relatifs à ces deux stades doivent être analysés et précisés en fonction des réalités étudiées. Pour le cas analysé ici, l'approche à suggérer s'inspirera de ce cadre théorique. Un aperçu des principales contraintes de la gestion actuelle s'avère nécessaire pour caractériser les réalités étudiées.

### **Les contraintes actuelles de gestion de l'eau en Tunisie**

La mobilisation des eaux de surface à travers les grands barrages est pratiquement terminée, les volumes stockés auraient même tendance à diminuer sur le long terme suite aux envasements des retenues. La construction des ouvrages de petite et moyenne hydraulique ne fait que mieux répartir spatialement la ressource globale sans pour cela augmenter les volumes stockés.

La volonté de favoriser le transferts des eaux superficielles vers les réservoirs souterrains transforment des ouvrages à priori simples en aménagements complexes : retenues superficielles connectées à des aquifères sur lesquels s'effectuent les prélèvements. Les aquifères sont transformés en réservoirs de gestion au même titre que les précédents et doivent être étudiés comme tels.

L'infrastructure hydraulique est devenue très complexe et sa gestion également. La présence, sur un bassin, de toute une série d'aménagements superposés avec des échelles d'intervention différentes génèrent toute une série d'impacts dont il faut tenir compte. L'étude de ces ouvrages (fonctionnement et gestion) ne peut plus se faire au niveau d'aménagements isolés, mais doit contempler l'ensemble du bassin.

Mais le principal défi est ailleurs.

La demande globale continue de croître avec les conséquences décrites précédemment. La maîtrise de la demande, voire sa diminution dans certaines régions, passe bien évidemment par une diminution de l'allocation au secteur agricole, de loin le plus grand consommateur avec des pratiques pas toujours efficaces mais qui représente une part importante du paysage socio-économique tunisien.

Parallèlement, l'agriculture irriguée tunisienne doit répondre à des objectifs fondamentaux stratégiques (sécurité alimentaire et promotion des exportations) dans un contexte en pleine mutation : ouverture totale aux marchés extérieurs et libéralisation complète du marché extérieur, demande croissante en produits alimentaires à des prix concurrentiels, émergence de nouveaux concurrents valorisant mieux leur ressource hydrique, désengagement financier progressif de l'Etat en faveur de structures collectives qui devront s'organiser.

Les outils disponibles sont nombreux (institutionnels et réglementaires, économiques, techniques) mais leur application pas toujours facile à mettre en œuvre et leurs impacts difficiles à déterminer. Les mesures à prendre doivent assurer une diminution des consommations sans provoquer un effondrement de la viabilité économique des exploitations agricoles. Cet effondrement qui aurait pour conséquence un abandon des terres irriguées par les exploitants qui augmenterait l'exode rural avec des conséquences économiques et sociales au niveau national.

Diminution de la pression sur la ressource en eau, viabilité économique et sociale, acceptation par les populations concernées, facilité de mise en pratique sont autant d'éléments qu'il faudra prendre en compte pour mesurer la pertinence des mesures envisagées. La gestion de la ressource est à renforcer mais elle doit être menée de manière concomitante avec la gestion de la demande en eau agricoles, au niveau des différents types génériques d'aménagements, puis au niveau d'ensembles territoriaux sur lesquels les ouvrages sont installés.

Au vu de cette description des contraintes actuelles pesant sur la gestion intégrée de l'eau, les remarques suivantes peuvent être formulées :

- la complexité des ouvrages augmente l'importance et la probabilité des externalités pouvant être engendrées par les usages de la ressource,
- les caractéristiques socio politiques des usagers des mêmes ouvrages interconnectés sont plus variées. A cette multiplicité des points de vue en présence, il y a lieu d'ajouter l'acuité des objectifs poursuivis par les pouvoirs publics. Ceci est de nature à rendre difficile la définition de règles de comportement acceptées par les acteurs en place.

- la pression sur la ressource eau est de plus en plus grande et augmente la rentabilité du non respect des règles de son allocation.

### **Approche méthodologique d'une politique d'accompagnement**

L'accroissement d'une demande en eau ne pouvant plus être dans la plupart des régions résolue par une action de mobilisation supplémentaire de la ressource en eau, la régulation par l'accroissement de l'offre est aujourd'hui terminée. Aujourd'hui la gestion de la demande et la recherche d'une adéquation Offre/Demande négociée semble la seule voie possible. Cette démarche impose de choisir une unité de gestion et de définir des niveaux de concertation.

- **choix de l'unité de gestion** : La négociation ne peut se construire au départ au niveau de l'unité spatiale que représente généralement le niveau cohérent de l'offre, c'est à dire l'ensemble d'un bassin versant ou d'une nappe phréatique compte tenu des dimensions territoriales en jeu et du nombre d'acteurs à impliquer dans le même ensemble.

Entre l'unité cohérente de décision que constitue l'exploitation agricole et l'espace cohérent qui représente l'offre globale un espace de négociation acceptable doit être défini. Cet espace de négociation semble pouvoir être maîtrisé au niveau des AIC ou GIC qui peuvent permettre l'émergence d'un espace collectif de négociation autour d'un petit ou moyen aménagement hydraulique, une zone de pompage privée, où un calage de l'offre potentielle peut être défini comme élément de base dans un espace social où l'individu peut participer à la négociation. Un tel espace est à définir en fonction des caractéristiques de l'offre d'eau mais aussi de celles des usagers.

- **niveaux de concertation** : Il apparaît nécessaire de hiérarchiser les niveaux de décisions et de définir les critères pertinents dans une démarche allant du stratégique à l'opérationnel.

L'analyse part d'une différenciation des différentes relations qu'entretiennent les producteurs avec leur environnement, physique, social et économique. Dans une approche de connexion de modèles d'offre en eau à des modèles de demande, la recherche de cohérence " au fil de l'eau " apparaît comme la voie de convergence des démarches

La recherche de cohérence, c'est à dire de compatibilité des décisions des divers niveaux se fera selon un processus itératif comportant deux principales étapes :

- La première phase que l'on peut qualifier de stratégique doit établir la cohérence des options de développement envisagées de l'entité de demande à l'entité d'offre.

Le premier niveau de décision se situe au niveau de l'exploitation agricole sur laquelle s'applique différents formalismes : technique, économique, spatial, et à différents niveaux stratégique et opérationnel. Entre contraintes et objectifs, l'exploitant met en place des moyens techniques et des stratégies de production qui vont dépendre de ses possibilités financières, de ses disponibilités en main d'œuvre, de ses habitudes ou encore de ses objectifs réels.(spéculation foncière, autoconsommation...).

Des modèles d'optimisation permettent de caractériser, comprendre les contraintes des systèmes, et des modèles de simulation pluriannuels amènent la réflexion sur les voies stratégiques possibles. Ces modélisations complémentaires nous conduisent à la formulation de scénarios débouchant sur différents niveaux de demande en eau dans un souci de pérennité du système de production. La démarche de prévision stratégique et l'optimisation du système sont ici individuels.

- Le deuxième niveau se situe au niveau du collectif socialement et techniquement pertinent (AIC,GIC). Le modèle de gestion de la ressource devient ici un concept global regroupant un ensemble d'individus. La démarche de construction devra tenir compte des différents niveaux et critères d'accès à la ressource par les agriculteurs, ce qui nous amène à construire une démarche d'agrégation sur trois niveaux : Zone /Mode de gestion /Technologie de captage et de distribution.
- Les stratégies individuelles exprimées notamment par des demandes en eau doivent s'insérer dans la contrainte collective de ressource définie au préalable par les gestionnaire de l'offre. Le processus de négociation renvoie par itérations successives les contraintes aux demandeurs donc au niveau individuel, afin de trouver un équilibre collectif.

Dans cette phase les modèles d'optimisation agrégés nous permettent d'appréhender les solutions de viabilité du niveau d'équilibre, d'aborder la ré allocation des facteurs de productions entre les systèmes individuels, et de fait de mesurer les niveaux de durabilité des systèmes individuels en terme de rentabilité.

Les modèles multi-agents permettent eux de générer des propositions de règles de fonctionnement en mesurant les impacts de différentes formes de règles d'organisation

Les outils de la théorie des jeux doivent nous aider à l'organisation du processus de négociation

Le modèle de simulation agrégé permet in fine de construire la base de dialogue entre les acteurs et de confronter leurs scénarios propres et d'y incorporer les acquis des modélisations de compréhension et de proposition initialement évoquées.

La deuxième phase du processus itératif : cette étape est conçue d'une part comme un moment de confirmation des demandes individuelles et de définition des domaines des choix individuelles et des compétences publiques.

Des écarts observés au cours de la campagne entre les premières prévisions de l'offre de l'unité globale de gestion ou/et des demandes individuelles devront déclencher la première étape du processus itératif. La gestion intégrée proposée apparaît donc comme un processus itératif continu.

## CONCLUSION

Sur le poutour méditerranéen, les sociétés rurales s'adonnant à l'irrigation ont vécu, depuis le début de ce siècle, de profondes transformations. Avec le concours des pouvoirs publics, les aspects techniques de mobilisation et de distribution de l'eau sont en général maîtrisés. En revanche, cette évolution s'est accompagnée par une destruction des institutions locales qui ont pu, à travers des siècles, gérer tant bien que mal la ressource. Pour suppléer ce manque, les pouvoirs publics ont conçu et mis en œuvre un montage institutionnel et législatif en charge de la gestion de la ressource.

Les premières évaluations de ces institutions confirment les difficultés que ces dernières ont à mettre en œuvre des règles de décision leur permettant de gérer des situations de conflit d'intérêts très complexes. La raréfaction de la ressource et les augmentations successives de son tarif ne font qu'aiguiser ces conflits.

Une approche itérative est proposée pour gérer ces situations. L'objectif premier de cette approche est l'instauration d'un cadre de négociation basé sur des données objectives et sur les stratégies des usagers. La pratique d'une telle négociation permet une accumulation de connaissances sur les usagers mais aussi sur les stratégies et les contraintes de l'instance centrale de gestion.

Il est évident qu'un tel processus devra être mené pendant de longues années pour aboutir à la définition de règles de gestion négociées et acceptées par les acteurs en présence.

## BIBLIOGRAPHIE

ARROW K.J - 1974

Choix collectif et préférences individuelles. Calmann-Lévy Paris

GENEREUX J- 1996

L'économie politique –analyse « conomique des choix publics et de la vie politique- Larousse Bordas.

Banque Mondiale – 1995 "Examen du secteur de l'eau" en Tunisie

BEDOUCHA 'G. - 1987 - L'eau, l'amie du puissant, une communauté oasienne du Sud tunisien. Paris, Editions des archives contemporaines.

BERQUE J. - 1955 - Les structures sociales du Haut-Atlas. Paris, PUF.

BOUDERBALA N., CHICHE J., HERZENNI A., PASCON P. - 1984 - La question hydraulique : petite et moyenne hydraulique agricole au Maroc. Rabat.

ETUDE DU SECTEUR DE L'EAU –1998 – Thème 1: Approches modèle de la prévision de la demande de l'eau, République de Tunisie, Ministère de l'Agriculture DGRE, Grp Bechtel International Inc./SCET-Tunisie, Août 1998

EL HAMAMI S. - 1984 - Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie. Tunis, CRGR, Imprimerie officielle.

FEDER G., LEMOIGNE G. - 1994 - Une gestion équilibrée des ressources en eau - Finances & Développement, juin 1994, 24-27.

FEUILLETTE S., LE GOULVEN P., BACHTA M.S. - 1998 - Les pouvoirs législatifs, réglementaires et juridiques en Tunisie confrontés à la gestion des nappes souterraines. Cas de la nappe de Kairouan en Tunisie centrale - Actes Colloque Soc. Fr. d'Ec. Rur., Montpellier, 19-20 nov. 98 (*soumis à Economie Rurale*).

JOUBE A.M. – 1998 – Questions sur l'irrigation comme instrument privilégié des politiques agricoles et alimentaires méditerranéennes (exemples du Maroc, de la Tunisie et de la Turquie), Traité d'Irrigation, Tec et Doc, Lavoisier, 1998, 737-757

SEN .A- 1970 The impossibility of a Paretian Liberal-, Journal of Political economy,78

WITTFOGEL K. - 1964 - Le despotisme oriental. Paris, Editions de Minuit.



# **VERS UNE GESTION OPTIMALE DES RESSOURCES EN EAU. EXEMPLE DE LA TUNISIE.**

Habaieb H\*, Albergel J.\*\*

\* *Institut National Agronomique de Tunisie*

\*\* *Mission IRD de Tunis*

## **RESUME**

La Tunisie reçoit en moyenne un volume d'eau de 36 Milliards de m<sup>3</sup> de précipitations annuelles alors que le potentiel en eau est de 4,570 Milliards de m<sup>3</sup> : 2,700 Milliards de m<sup>3</sup>/an représentent les eaux de ruissellement et 1,870 Milliards de m<sup>3</sup>/an vont alimenter tous les ans les nappes qui constituent les ressources renouvelables en eaux souterraines. La confrontation entre les ressources et les besoins, qui croissent d'une année à l'autre, fait apparaître un déficit. Pour combler ce déficit, une stratégie s'articulant sur la recherche de ressources non conventionnelles et l'économie de l'eau a été adoptée. Cette stratégie comporte essentiellement la réutilisation des eaux usées et traitées, la réutilisation des eaux de drainage, le développement des techniques d'économie d'eau (eau potable et irrigation) et le transfert de l'eau.

## **INTRODUCTION**

La Tunisie demeure un pays aride à semi-aride sur les ¾ de son territoire. Elle se caractérise par la rareté de ses ressources en eau et par une variabilité accentuée du climat dans l'espace et dans le temps. L'eau est un facteur essentiel pour le développement du secteur agricole, industriel et touristique et vital pour l'alimentation en eau potable. Le maintien de la croissance économique reste tributaire du facteur eau qui est cependant un facteur limitant et limité.

## **REPARTITIONS SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA PLUVIOMETRIE**

Le régime des pluies en Tunisie est le régime méditerranéen, mais il est loin de présenter un caractère uniforme. La Tunisie comme toute l'Afrique du nord est placée sur une zone de discontinuité climatologique sur laquelle des faibles causes peuvent produire des effets excentriques très importants par rapport aux normes (exemples des pluies de Septembre-Octobre de 1969, de Mars 1973 et de Janvier 1990). La Tunisie reçoit en moyenne un volume d'eau de 36 Milliards de m<sup>3</sup> de précipitations annuelles (avec une moyenne de 230 mm/an).

On peut distinguer quatre zones pluviométriques (Fig.1) :

- une zone très pluvieuse recevant annuellement plus de 600 mm avec 120 jours de pluie; nous pouvons même atteindre des quantités supérieures à 1500 mm,
- une zone pluvieuse recevant 400 à 600 mm de pluie avec 60 à 100 jours pluvieux,
- une zone peu pluvieuse recevant 200 à 400 mm de pluie avec 40 à 70 jours de pluie,
- une zone très peu pluvieuse recevant moins de 200 mm avec environ 30 jours de pluie.



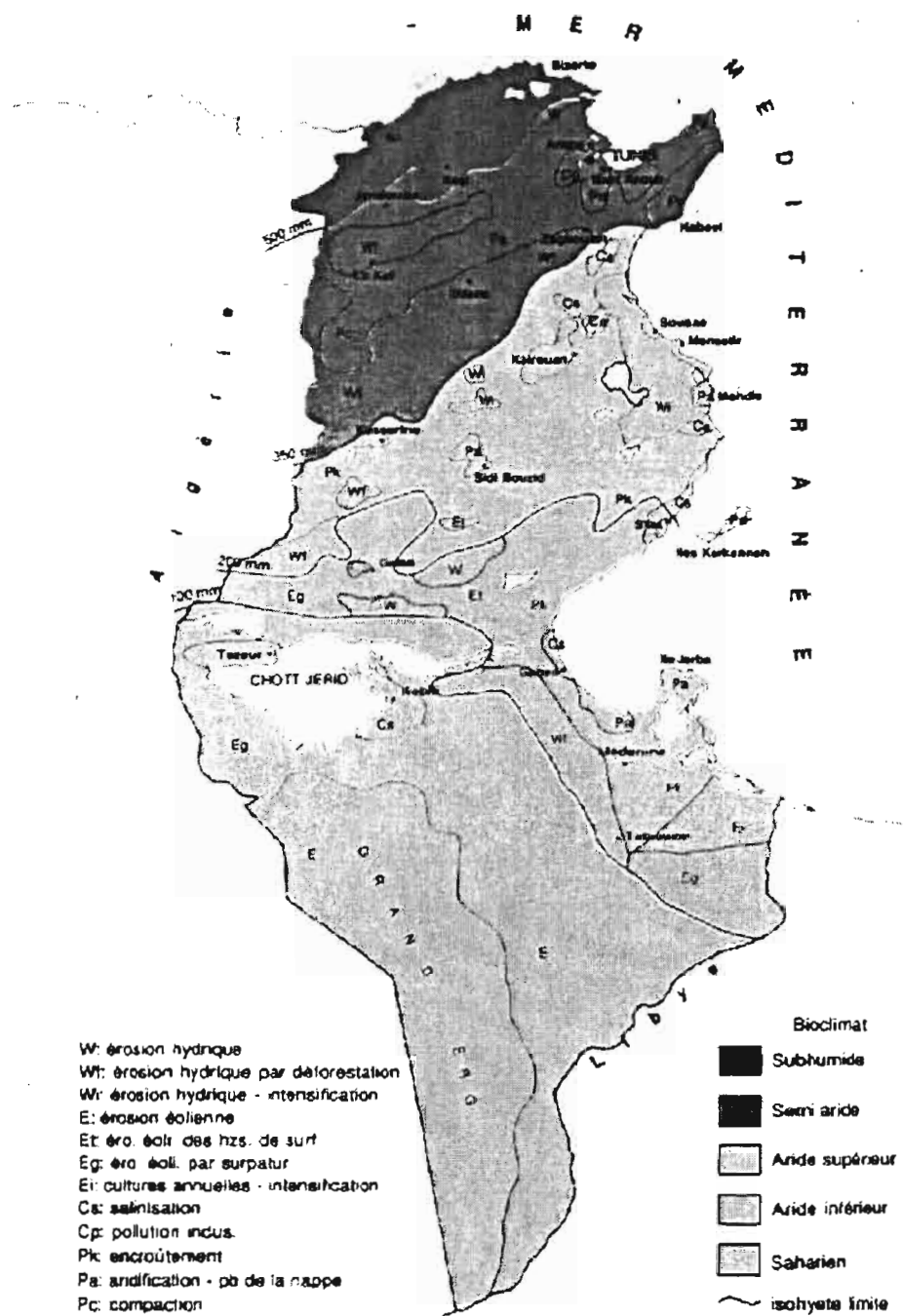


Fig.1. Répartition de la pluviométrie

A cette mauvaise répartition spatiale de la pluviométrie vient s'ajouter une répartition temporelle très irrégulière. A titre d'exemple, nous présenterons à la figure 2, la variation de la pluviométrie annuelle de la station de Tunis.

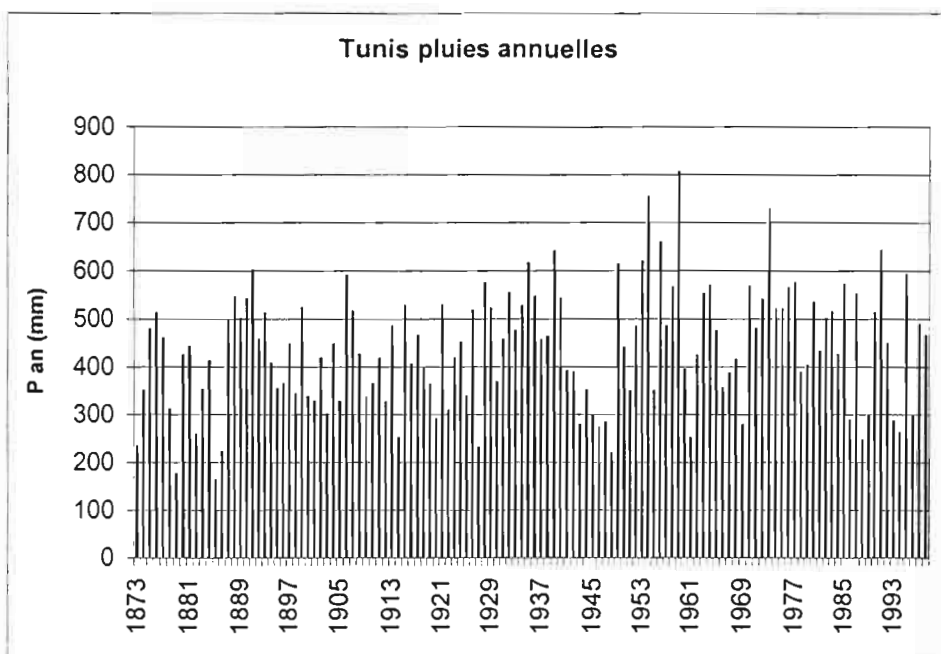


Fig.2- Variation annuelle de la pluviométrie à Tunis

## LES RESSOURCES EN EAU

Le potentiel des ressources en eau en Tunisie a subi une évolution considérable depuis les années 70 (Tab. 1) :

Année	1977	1980	1985	1990
Eaux de surface	2,000	2,580	2,630	2,700
Eaux souterraines	1,100	1,520	1,720	1,870
Total	3,100	4,100	4,350	4,570

Les ressources en eau mobilisable sont passées de 2,6 Milliards de  $m^3$  en 1990 (soit 57% des ressources) à 3,6 Milliards de  $m^3$  en 1999 (soit 79% des ressources). Ces ressources seront de 3,85 Milliards de  $m^3$  en 2001 (soit 84% des ressources) et 4,1 Milliards de  $m^3$  en 2004 (soit 90% des ressources). Plusieurs nouvelles infrastructures hydrauliques, en cours d'étude, verront le jour au cours de la prochaine décennie : 11 grands barrages, 50 barrages ou lacs collinaires.

Le potentiel en eau de surface du pays est déterminé grâce au réseau national de mesures pluviométriques et hydrométriques des différents bassins versants du pays. La répartition régionale des ressources s'établit comme suit :

- Tunisie du nord	:	2,190 Milliards de $m^3$ , soit 81%.
- Tunisie du centre	:	0,320 Milliards de $m^3$ , soit 12%.
- Tunisie du sud	:	0,190 Milliards de $m^3$ , soit 7%.
Total	:	2,700 Milliards de $m^3$

Les ressources en eau mobilisable représentent 81% des ressources en eau de surface et 50% de la totalité des ressources en eau.

L'état actuel de la mobilisation des eaux de surface se résume comme suit :

- Les barrages	:	1,612 Milliards de $m^3$
- Les barrages collinaires	:	0,078 Milliards de $m^3$
- Les lacs collinaires	:	0,072 Milliards de $m^3$
- Les ouvrages d'épandage des eaux de crue et principaux cours d'eau pour l'irrigation de 13100 ha	:	0,023 Milliards de $m^3$
Total	:	1,785 Milliards de $m^3$

Le potentiel des ressources en eaux souterraines, établi par la Direction des ressources en eau, se répartit comme suit :

- nappes phréatiques	:	0,700 Milliards de m <sup>3</sup>
- nappes profondes	:	1,170 Milliards de m <sup>3</sup>
Total		1,870 Milliards de m <sup>3</sup>

L'état actuel de la mobilisation des nappes phréatiques est de 75% (c'est à dire 0,525 Milliards de m<sup>3</sup>) et de 100% pour les nappes profondes (c'est à dire 1,170 Milliards de m<sup>3</sup>).

En conclusion, le potentiel de nos ressources en eau n'excède pas les 4,570 Milliards de m<sup>3</sup>/an :

- 2,700 Milliards de m<sup>3</sup>/an représentent les eaux de ruissellement qui sont mobilisées au moyen de barrages, retenues collinaires et ouvrages de collecte d'épandage des crues.
- 1,870 Milliards de m<sup>3</sup>/an vont alimenter tous les ans les nappes qui constituent les ressources renouvelables en eaux souterraines.

Mais quels sont les besoins de la Tunisie ?

## **LES BESOINS EN EAU**

Pour un climat méditerranéen (type pays du nord de la Méditerranée), les besoins par habitant se répartissent comme suit :

- besoins domestiques	:	30 m <sup>3</sup> /an
- besoins industriels	:	20 m <sup>3</sup> /an
- besoins agricoles	:	400 m <sup>3</sup> /an
Total		450 m <sup>3</sup> /an

Actuellement la population de la Tunisie est de 9,5 Millions d'habitants. Deux scénarios quant à l'évolution des besoins en eau par habitant sont envisageables :

a) Scénario 1 : Un niveau de vie d'un européen actuel (besoin de 510 m<sup>3</sup>/an/habitant pour une agriculture de pays tempéré)

Besoin de 9,5 Millions d'habitants*510m <sup>3</sup> /an/habitant	:	4,845 Milliards de m <sup>3</sup>
Ressources	:	4,570 Milliards de m <sup>3</sup>
Déficit	:	0,275 Milliards de m <sup>3</sup>

A combler par des ressources non conventionnelles

b) Scénario 2 : Un niveau de vie d'un européen actuel (besoin de 1200 m<sup>3</sup>/an/habitant pour une agriculture intensive et en tenant compte de l'aridité)

Besoin de 9,5 Millions d'habitants*510m <sup>3</sup> /an/habitant	:	11,400 Milliards de m <sup>3</sup>
Ressources	:	4,570 Milliards de m <sup>3</sup>
Déficit	:	6,830 Milliards de m <sup>3</sup>

A combler par des ressources non conventionnelles.

En ce qui concerne la Tunisie, la réalité se situe dans un scénario intermédiaire. Donc, nous avons un déficit qui peut être important. C'est pour cette raison qu'a été adoptée une stratégie qui s'articulera sur la recherche de ressources non conventionnelles et l'économie de l'eau.

## **STRATEGIE DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU**

### **Réutilisation des eaux usées et traitées**

Le développement de l'urbanisation, du tourisme et de l'industrie ont poussé les autorités tunisiennes à entreprendre les mesures adéquates afin de protéger les sites de rejet des eaux usées d'une pollution certaine à plus ou moins longue échéance. La création des stations d'épuration autour des principales concentrations urbaines et touristiques est devenue impérative comme mesure de prévention et de réduction du risque. Avec la réalisation des stations d'épuration dans les diverses régions du pays, le volume des eaux épurées rejetées devient de plus en plus important. Ces eaux constituent actuellement des ressources non négligeables pour la création des périmètres irrigués. Les rejets des eaux usées des stations d'épuration dépassent 120 Millions de m<sup>3</sup>/an et pourront atteindre 170 Millions de m<sup>3</sup>/an en 2006. Cette eau de "seconde main" est toujours disponible indépendamment des saisons. Le recyclage de ces importantes quantités d'eau en agriculture (culture fourragère et certaines cultures fruitières) est une solution judicieuse. La réutilisation de ces eaux traitées débouchera sur deux profits capitaux pour l'agriculture (en tenant profit des éléments fertilisants que

l'eau usée peut apporter à la plante) et pour l'environnement (en éliminant une eau traitée présumée encore dangereuse pour certains milieux récepteurs).

### Réutilisation des eaux de drainage

Les eaux de drainage constituent une ressource non négligeable. Les superficies irriguées sont estimées à 345000 ha qui représentent 7% de la superficie agricole utile, tout en mobilisant presque 1500 Millions de m<sup>3</sup>/an d'eau d'irrigation. Approximativement, nous pourrions récupérer de ces eaux d'irrigation 150 Millions de m<sup>3</sup>/an qui pourront être surveillés (sur le plan qualité) et réutilisés.

### Développement les techniques d'économie d'eau

L'économie de l'eau demeure une composante principale de la gestion des ressources en eau. L'ensemble des pertes entre la production de la ressource et son utilisation est estimé à 25% en 1998. Si on ajoute les différents gaspillages afférents à une mauvaise ou sous-utilisation de la ressource, on peut estimer à 35% du volume global de la ressource, les quantités d'eau qui sont actuellement perdues. Plusieurs tentatives d'économie d'eau ont été utilisées en Tunisie.

*Pour le secteur agricole*

- la modernisation des conduites d'adduction et des réseaux d'irrigation,
- l'amélioration de la gestion de l'eau à la parcelle: techniques d'irrigation, par exemple l'utilisation de l'irrigation au goutte à goutte; actuellement l'Etat finance entre 40 à 60 % du prix du matériel utilisé pour l'irrigation dans le but d'une économie de l'eau,
- l'introduction des techniques nouvelles de contrôle de l'irrigation (irrigation déclenchée par mesure automatique du stock d'eau dans le sol, ferti-irrigation permettant de valoriser au mieux les intrants, contrôle de fertilisants dans le sol,...),
- l'encouragement des associations d'agriculteurs ayant pour tâche le partage et la gestion de l'eau.

*Pour l'eau potable :*

- la modernisation des conduites d'adduction et des réseaux de distribution d'eau ainsi que l'instauration des systèmes de détection et de contrôle de fuites. Par rapport aux volumes d'eau distribués, le pourcentage des volumes d'eau perdus est passé de 30% en 1990 à 21% en 1998, malgré l'augmentation des volumes d'eau distribués qui sont passés de 180 Millions de m<sup>3</sup> en 1987 à 265 Millions de m<sup>3</sup> en 1998.
- L'amélioration des caractéristiques des accessoires sanitaires (robinetterie, chasses d'eau)
- la sensibilisation des utilisateurs en commençant par les gros consommateurs (hôteliers, administration, usines,...)
- la révision de la tarification des eaux : taux progressifs en fonction du volume consommé (Fig.3). Une étude faite par la Société Nationale de Distribution de l'Eau a permis de constater qu'entre 1984 et 1994, une bonne partie des gros consommateurs (> 150 m<sup>3</sup>/trimestre) a été répartie en moyens et faibles consommateurs (<70m<sup>3</sup>/trimestre).

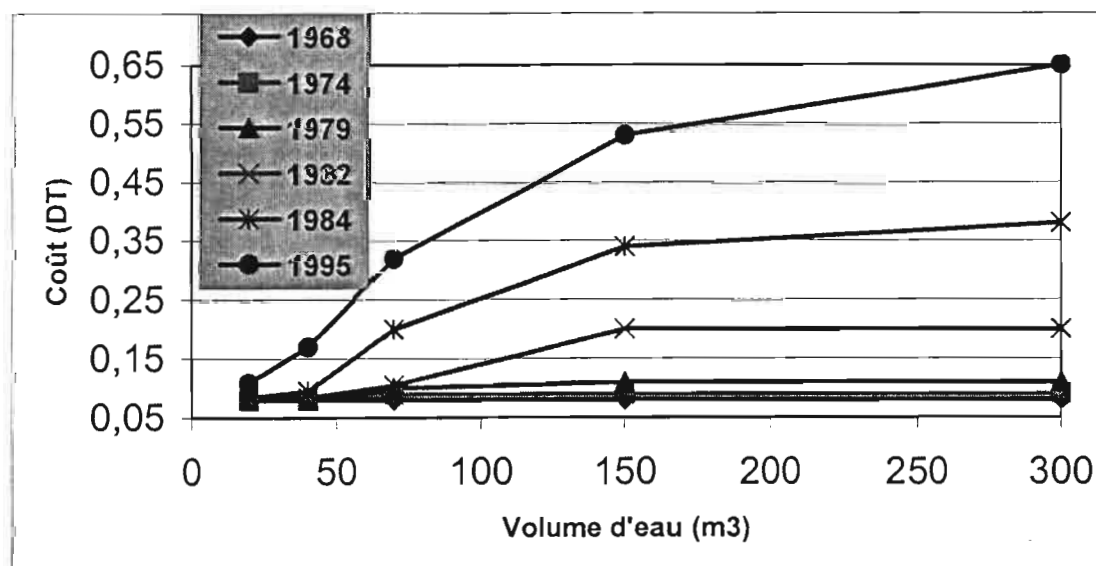


Fig.3- Evolution du prix de l'eau potable en Dinars tunisien par trimestre

## Le transfert de l'eau

La Tunisie se trouve confrontée au problème de non coïncidence des secteurs de consommation de l'eau avec sa production. Le développement agricole est soutenu dans les diverses régions du pays et une concentration urbaine est accélérée dans les zones côtières. Le transfert de l'eau est destiné à corriger les écarts de distribution spatiale et à réduire les inadéquations ressources/besoin en accordant la priorité à la satisfaction en eau potable et au rendement maximum du m<sup>3</sup> d'eau. Pour permettre une gestion souple de l'ensemble des ouvrages, deux grands axes ont guidé leur conception : possibilité d'interconnexion entre les barrages (situés dans un même bassin versant) et possibilité du transfert d'un bassin versant à un autre. Cette conception a permis d'optimiser la gestion en :

- évitant le plus possible les déversées de barrages rejetés vers la mer et de stocker ainsi le maximum d'eau,
- améliorant la qualité d'eau utilisée par la possibilité de mélange entre les apports des affluents de différentes qualités.

Un exemple de transfert de l'eau en Tunisie est donné à la figure 4.

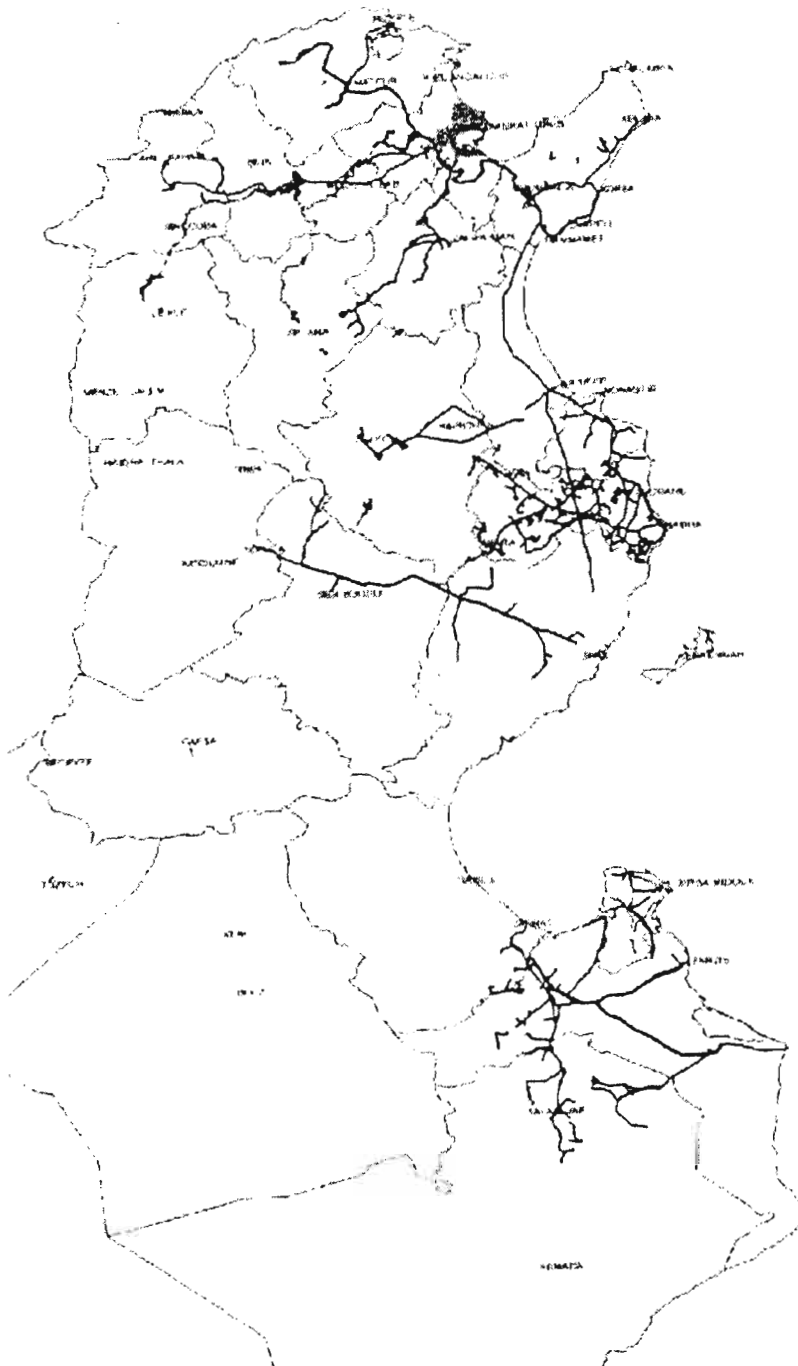


Fig.4. Transport de l'eau des zones de production vers les zones de consommation

## BIBLIOGRAPHIE

- BACHA, M. (1996) Le plan décennal de développement et de mobilisation des ressources en eau. Ministère de l'Agriculture. Avril 1996.
- HABAIEB, H. et CH. LAROUSSI (1992) Gestion des ressources en eau en condition d'aridité, cas de la Tunisie. Workshop 'Water Resources : Development and Management in Mediterranean Countries'. Adana, Turquie. 3-9 septembre 1992.
- KHAZEM, A. (1992) Rapport National sur la gestion des systèmes de distribution des eaux, les grands transferts de l'eau et la collecte, le traitement et la réutilisation des eaux usées. Colloque Hydrotop. Marseille du 7 au 11 avril 1992.



# OPTIMISATION DES REGLES DE GESTION DES BARRAGES COLLINAIRES DANS LES PAYS SEMI-ARIDES

Lebdi F., Le Goulven P. et Pabiot F.

## PRESENTATION

L'hydrologie actuelle et future proche en Tunisie est focalisée en grande partie sur la maîtrise de la demande et l'amélioration des performances du système de mobilisation des ressources. La gestion des ressources en eau devient dès lors un souci permanent des décideurs, en vue d'une meilleure satisfaction de besoins en eau de toute nature, qui ne cessent d'évoluer avec une tendance à la hausse (irrigation, alimentation en eau potable, industrie et tourisme). L'exemple suivant montre l'importance des usages en termes de volumes mobilisés :

- surface irriguée = 1000 Ha
- débit fictif continu = 0,8 l/s/ha
- durée de fonctionnement en pointe = 18h/24
- débit d'équipement = 1,06 m<sup>3</sup>/s
- volume journalier approximatif = 72 000 m<sup>3</sup>

Si l'objectif de la gestion serait l'AEP d'une ville et si la consommation journalière est de 200 l/j/hbt, un volume journalier de 72000 m<sup>3</sup> correspondrait à l'AEP d'une ville de 500 000 hbt.

L'importance des volume alloués à l'irrigation font que les règles de gestion d'un barrage réservoir pour ce type d'usage, telles qu'on les conçoit en zones semi-arides, consistent à trouver un compromis entre la quantité d'eau à distribuer au cours de l'été et les volumes de ressources indispensables à la levée des futurs semis de l'automne. Ces règles de gestion inter-annuelle sont confirmées par la conjonction de la rareté de la ressource ainsi que de son irrégularité et la disjonction entre la période des apports et celle où les besoins en eau se déclarent. Le problème de la gestion des ressources en eau est fortement stochastique dans les zones semi-arides du fait de la méconnaissance des processus physiques (pluie-débit) et de la nature de l'information incomplète et souvent entachée d'erreurs.

Nombre de méthodes mathématiques ont été utilisés dans ce domaine de la gestion de l'eau. YEH (1985) a brossé un état de l'art en la matière. Yakovitz (1982) a dressé un panorama complet de la première famille de méthodes et les méthodes de programmation dynamique ont été activement étudiées depuis les travaux de MASSÉ (1959).

D'autres techniques peuvent aussi être mises en œuvre. Ainsi YAZICIL et al (1983) ont-ils mis en place une gestion multi-objectif multi-réservoir (Green River Basin) respectant le choix des décideurs en minimisant par programmation linéaire les écarts à des courbes de vidange. Pourtant quelle que soit la technique utilisée, la modélisation se heurte à de nombreux obstacles :

- Il est souvent difficile de quantifier l'objectif de gestion. Le problème de la gestion des systèmes hydro-agricoles a souvent été abordé dans le cadre de la programmation dynamique,
- L'aspect multi-objectif de la gestion où les usages sont multiples et ne peuvent être décrits par un seul critère,
- Le critère stochastique des aléas hydrologiques et du comportement des usagers de la ressource doit être intégré dans la modélisation de la gestion. Un choix simplificateur est alors d'utiliser la programmation dynamique sur des scénarios d'évolutions possibles (GOUSSEBAILLE ET ROCHE) ou de tester par simulations ou ajustement une classe restreinte de règles de gestion (BHASKAR ET WHITLACH). Sinon, la prise en compte explicite des aléas, en sus de la complexité des algorithmes de programmation dynamique stochastique qu'elle entraîne, doit rendre compte des notions de fiabilité et de défaillance de gestion (ASKEW, SIMONOVIC, ORLOB, RICHARD ET TURGEON).

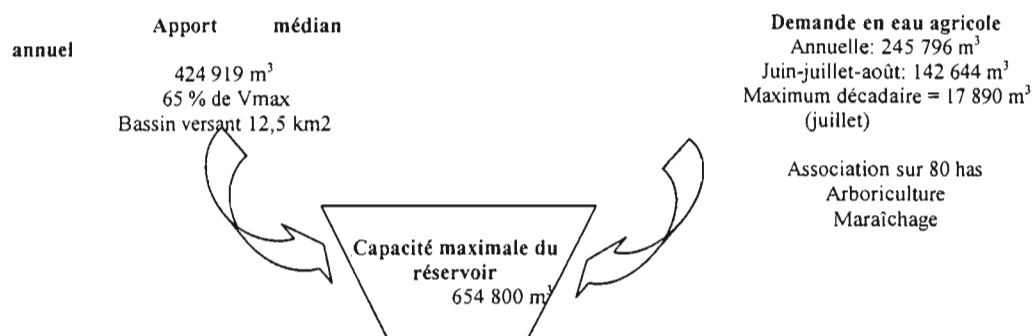
Dans ce qui suit, on introduit un modèle de gestion du barrage collinaire EL MORRA, situé sur le bassin du Merguellig en Tunisie. Deux objectifs de gestion ont été choisis : la satisfaction de la demande agricole et la garantie d'un stock minimum dans le barrage. L'optimisation des règles de gestion devra préciser le poids optimum à donner à chaque objectif partiel, au travers de la détermination des critères de risque reliés à chaque règle optimisée.



## DESCRIPTION DU SYSTEME EL MORRA :

Le barrage collinaire El Morra est situé sur le bassin versant du Merguellil (centre de la Tunisie) et l'objectif principal qui lui est affecté est l'alimentation d'un périmètre irrigué proche de la digue.

En moyenne, les apports sont suffisants pour satisfaire les besoins agricoles, mais la variabilité interannuelle des écoulements est très forte (écart-type de 342 500 m<sup>3</sup>). La demande agricole est inférieure aux apports moyens mais il y a risque de pénurie en période de estivale, au moment où les cultures spéculatives de melon et de pastèque sont en plein développement. La retenue doit donc contenir suffisamment d'eau de mars à août pour satisfaire la demande agricole tout en étant capable de laminer les crues de septembre - octobre et mars - avril.



## PRESENTATION DES TERMES DU BILAN AU BARRAGE

Une station hydroluviométrique a été installée sur le barrage en mars 1996 (Bourges J et al, 1996), permettant de recueillir des données journalières d'évaporation, de pluie et de niveaux d'eau dans la retenue.

### Relation hauteur-volume-surface (HVS)

Une seule bathymétrie a été effectuée sur le barrage lors de sa construction en 1992. LA surface de la retenue est déduite de la hauteur (h) par interpolation linéaire entre deux points de référence. La relation volume (v en m<sup>3</sup>)-hauteur (h en m) est fixée par lissage polynomial d'ordre 3 :

$$V = 87,722.H^3 + 2882,1.H^2 + 22429.H + 52000$$

### Equation du bilan dans la retenue

Sur un intervalle de temps donné, l'équation générale du bilan hydrique est la suivante :

$$\Delta V = (V_r + V_{ecs} + V_p) - (V_{ev} + V_d + V_{inf} + V_u)$$

- $\Delta V$  : la variation de stock est connue d'après l'enregistrement limnigraphique
- $V_p$  : apports dus aux précipitations sur la retenue, déduits des enregistrements pluviographiques et de la courbe hauteur-surface de la retenue
- $V_{ev}$  : correspond à l'évaporation. Elle est estimée d'après les mesures journalières de bacs et la surface moyenne le même jour. Cette estimation reste soumise à erreur du fait du choix du coefficient de passage de l'évaporation bac à l'évaporation retenue.
- $V_d$  : déversement (le barrage n'a pas encore déversé)
- $V_u$  : vidange de fond, connue d'après les côtes lues avant et après manœuvre
- $V_r$  : apports par ruissellement. C'est une première inconnue du bilan car il n'y a pas de station de jaugeage contrôlant les entrées du barrage. Son estimation a été effectuée par reconstitution des crues
- $V_{inf}$  : volume infiltré, qui est fonction de la charge hydraulique de la retenue et donc du volume stocké. C'est la seconde inconnue du bilan.
- $V_{ecs}$  : apports par écoulement souterrain et c'est la troisième inconnue du bilan.

## Reconstitution des apports

En climat semi-aride, les crues sont violentes et courtes dans le temps. Au pas de temps journalier (le ruissellement existe encore), on peut considérer que l'infiltration ainsi que l'évaporation sont négligeables par rapport aux apports par ruissellement. L'équation du bilan est alors simplifiée. Les volumes enregistrés ont été alors lissés pour les crues suivies, du fait de l'erreur dans les enregistrements sur le limnigraphe (jour de grand vent et absence de crue) qui pose problème lors du calcul des termes du bilan journalier.

## Reconstitution des flux évaporatifs

L'évaporation de la surface de la retenue est estimée à partir d'un bac colorado situé sur le site de l'étude, en prenant un coefficient de passage égal à 0,8 (zone ventée). Les flux évaporatifs sont déduits d'une série observée avec des moyennes journalières sur trois années. Ces valeurs sont corrélées au volume stocké dans la retenue, à travers une expression linéaire du type  $V_{ev} = a V + b$ .

## Reconstitution des infiltrations

Elles peuvent être estimées par reconstitution des sécheresses, ce qui donne :

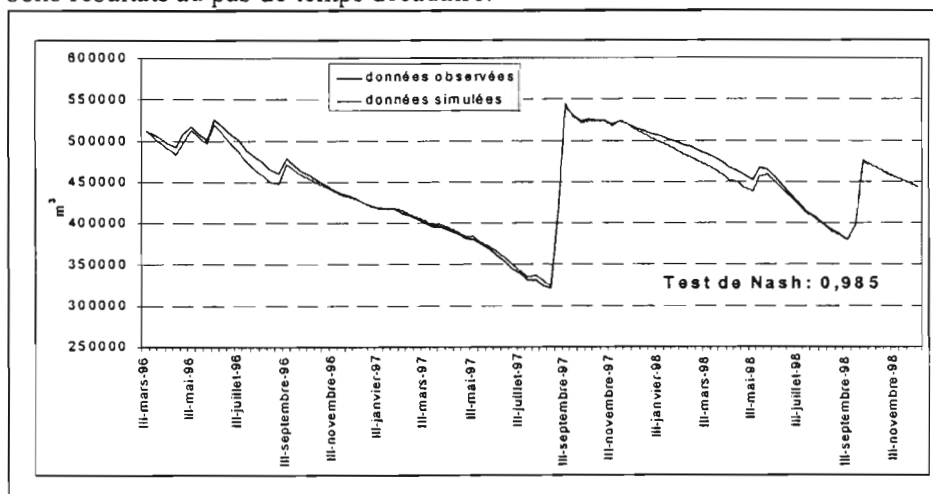
$$V_{inf} = \Delta V - V_{ev}$$

Les conditions de ce bilan sont une absence de pluie pendant la dernière quinzaine de jours et une variation négative du stock d'eau. Ce volume infiltré est corrélé au niveau de stock dans le barrage, selon une expression puissance  $V_{inf} = c + V^b$  (Modèle SIMGES).

## La série chronologique des apports

En vue d'une optimisation des règles de gestion, il est nécessaire de disposer d'une longue série d'apports, pour mieux appréhender l'aléa hydrologique. En considérant les pluies, les apports ont été reconstitués à l'aide du modèle pluie-débit GR3 du CEMAGREF (logiciel EMILE2, IRD). Ce modèle est calé à partir de trois années de mesures au barrage. Une génération des apports est alors effectuée pour disposer d'une longue série à partir d'une série de 24 années de pluie reconstituée des stations voisines et du modèle pluie-débit calé.

La reconstitution du fonctionnement est réalisée sur les 3 ans d'observation de la retenue et donne de bons résultats au pas de temps décadaire.



## OPTIMISATION DES REGLES DE GESTION DU BARRAGE

L'optimisation des règles de gestion s'appuie sur une équation de bilan qui reflète au mieux le comportement réel du système hydrologique. Le développement du modèle se base sur l'identification des variables d'état, de la variable de décision et sur la formulation des contraintes hydrauliques et de la fonction objectif. La formulation du modèle d'optimisation se définit par :

### Les états du système

Les variables d'état concernent celles du bilan (apports, évaporation, ...) et le stock dans le barrage au début de toute période de gestion.

## Les commandes

La variable de décision est la lâchure effectuée à l'instant  $t$  qui est  $L(t)$ .

## La fonction d'évolution

Elle dépend du temps et revient à l'expression du bilan du barrage, en tenant compte de  $L(t)$ . Elle exprime le caractère dynamique de la gestion.

## Les contraintes

Elles s'expriment sur les valeurs minimum et maximum du stock d'eau dans le barrage et sur les capacités de transit des lâchures à effectuer :

$$\begin{aligned} V_{\min} &\leq V(t) \leq V_{\max} \\ L_{\min} &\leq L(t) \leq L_{\max} \end{aligned}$$

## La fonction objectif

Lors de l'optimisation des règles de gestion, il a été fait usage d'un critère formulé, avec une pondération de deux objectifs, qui consiste en une minimisation simultanée et pondérée du déficit par rapport à un stock cible et de l'écart par rapport aux demandes en eau. Autrement dit, une partie du critère consiste à garder l'eau le plus longtemps dans la retenue pour pouvoir faire face à des éventualités non prévues et l'autre partie consiste à satisfaire les demandes en eau à l'aval du barrage. La formulation mathématique s'écrit de la façon suivante :

$$\text{MIN} \sum_{t=1}^{11} \left[ \alpha \left( \frac{S_{t+1} - S_{\text{consig}}}{S_{\max}} \right)^2 + (1 - \alpha) \left( \frac{u_t - B_t}{B_{\max}} \right)^2 \right]$$

$S_{t+1}$  : Stock final à la fin de chaque période de gestion,

$S_{\max}$  : Volume exploitable maximum ( volume utile du réservoir ),

$S_{\text{consig}}$  : Stock cible ( stock souhaité à la fin de la période de gestion ),

$\alpha$  : Coefficient de pondération compris entre 0 et 1,

$u_t$  : lâchure à optimisée entre le temps  $i$  et  $(i+1)$ ,

$B_t$  : Demande en eau affichée en début de la période de gestion,

$t = 0$  : correspond au début du mois de septembre.

Il ne s'agit pas dès lors de conduire une optimisation sur un bénéfice économique, pour se substituer de façon automatique à la volonté de gestionnaire. Le compromis à réaliser s'appuie simplement sur la répartition du poids relatif de chacun des objectifs ( satisfaire des demandes en aval du barrage et garantir un stock de sécurité pour faire face à des événements exceptionnels ). On simulera cette gestion sur des chroniques synthétiques, de façon à comparer les règles optimales pour chaque valeur de  $\alpha$  ( pondération de chaque objectif ), et de choisir les valeurs admissibles selon les désirs du gestionnaire du système (explicité à travers la fonction objectif et les contraintes ).

Pour ce faire, on est amené à tracer les diagrammes de paréto qui représentent les indices de performance correspondants aux événements dommageables qui peuvent survenir au cours du temps. Ceci facilitera le choix de la valeur optimale de  $\alpha$ , qui donne un meilleur compromis entre les deux objectifs de gestion.

Le modèle de gestion est par nature stochastique et les apports ne sont pas connus pour chaque pas de temps. Ainsi, à chaque niveau de stock à l'instant  $(t+1)$  correspond un apport et une probabilité d'occurrence de cette valeur d'apport. Ainsi, pour un niveau de stock initial à l'instant  $t$ , le système évoluera vers au plus «  $n$  » états finaux, avec  $n$  le nombre de valeurs d'apports possibles. Aussi, selon MORAN, un schéma simple de discrétisation des niveaux de stock et des classes d'apports, en nombre fini de  $n$  classes égales, permet d'appliquer des algorithmes d'optimisation type programmation dynamique stochastique (PDS).

## Optimisation par Programmation Dynamique Stochastique (PDS)

Le processus d'optimisation par PDS est basé sur une équation récursive permettant d'optimiser le critère objectif défini précédemment en tenant compte des probabilités d'apparition des apports sur un horizon de temps donné :

- l'horizon de temps choisi pour le calcul est l'année car le barrage collinaire n'est pas un ouvrage de régulation inter-annuelle,

- le pas de temps de calcul est la décade sachant que c'est la durée minimum pour simuler correctement le fonctionnement du barrage et que les apports d'une décade à une autre sont indépendants (test d'autocorrélation de Wald - Wolfowitz),
- les apports et les volumes stockés dans la retenue sont discrétisés en classes de 3000 m<sup>3</sup>, volume qui correspond à la demande agricole minimale par décade et qui sera pris comme unité de base dans le calcul.

A chaque itération de la procédure d'optimisation, le gain espéré optimal est calculé pour chaque état du système. Lorsque ce gain devient constant d'une période à une autre, le critère de convergence par la stabilisation d'accroissement de la fonction est rempli (Louks et al, 1981). La procédure d'optimisation dite décision/hasard, où la variable apport est à l'origine du hasard et intervient par sa probabilité d'occurrence :

\*  $C_{ir}$  : coût de la transition entre  $S_i$  et  $S_j$

\*  $P_{rj}$ ,  $C_{rj}$  : probabilité de la transition  $S_i$  à  $S_j$  et  $C_{rj}$  la valeur de cette transition.

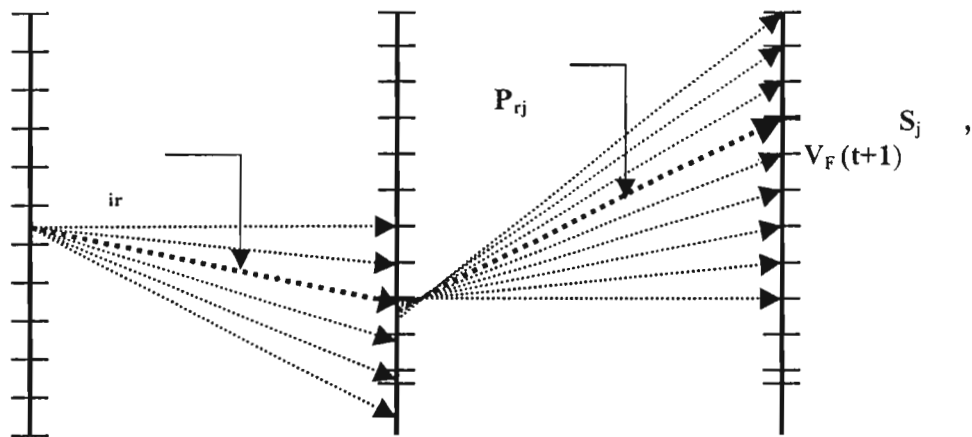


Schéma d'optimisation décision/hasard

## DEFINITION ET CHOIX DES INCIDENTS ET DES INDICES DE PERFORMANCE DU SYSTEME

L'objectif de définir ce que peuvent être un événement dommageable et des indices de performance, revient à juger de l'opportunité d'une règle de gestion sur la base des mêmes paramètres. On s'intéressera ici aux incidents, liés au déficit du stock. Par incident, on entend tout événement, tel le fait pour un réservoir d'atteindre un niveau bas alarmant, qui se produit hors d'une gamme de limites pré-spécifiées ou niveaux de consignes.

Il est important de séparer un objectif pondéré d'un minimum de déficit de remplissage ou un stock cible à atteindre à chaque fin de période de gestion, de l'éventualité d'occurrence d'un événement dommageable, qui peut survenir lorsque les conditions climatiques n'arrivent pas à garantir l'objectif affiché, pour la règle de gestion choisie. Ces événements sont des incidents probables et réels qui peuvent être intégrés individuellement dans la gestion. Ils sont alors quantifiés une fois la règle de gestion optimale choisie pour  $\alpha$  fixé et servent à mesurer les performances de cette dernière.

❶ **Défaillance du stock** : avant la fin de la période de gestion on a complètement vidé le réservoir. Cette situation dépend à la fois des aléas hydrologiques et de la politique de gestion suivie jusqu'à cette date (PARENT, 1992).

❷ **Demande non satisfaite** : à un instant donné, le stock d'eau dans le réservoir n'arrive pas à satisfaire les différents objectifs partiels.

❸ **Déversement** : ceci n'est pas à proprement parler un incident mais c'est un paramètre utile, car c'est le complément logique du premier incident.

A chacun de ces incidents, on associe, pour une règle de gestion donnée, divers indices de performance, à savoir :

- ① Le risque : c'est la probabilité de voir à un instant donné, l'événement en question se réaliser.
- ② La résilience : c'est à dire une estimation du temps moyen au bout duquel le système retourne à un état satisfaisant lorsque s'est produit un incident.
- ③ La vulnérabilité : qui mesure l'ampleur du risque, c'est à dire l'importance moyenne d'un incident pour les usagers de la ressource.
- ④ La durée du séjour du système dans un état de défaillance.
- ⑤ La probabilité stationnaire que le système soit dans un état de défaillance.
- ⑥ Le temps du premier passage vers un état de défaillance.
- ⑦ Le temps moyen entre deux états : satisfaction totale et défaillance.

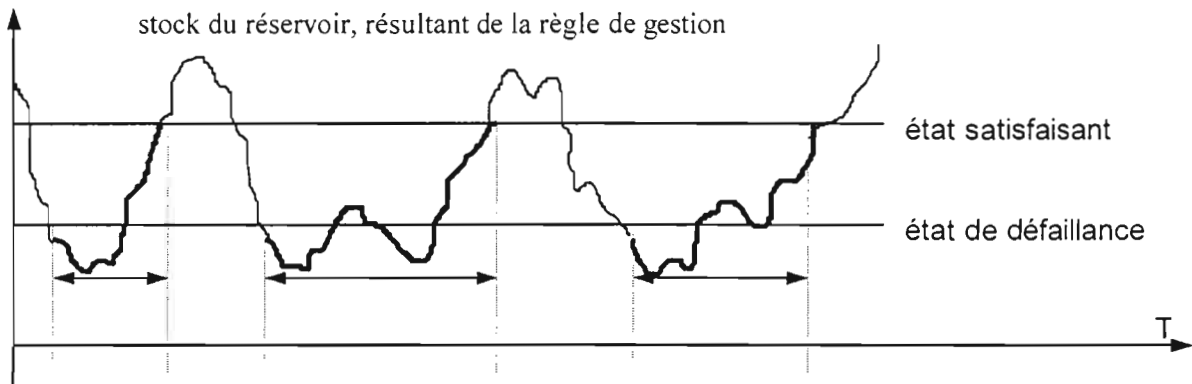


Fig. 2.3.1 : représentation de la résilience du système

d'après la définition de la résilience, on peut écrire :

$$Résilience = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3}$$

La figure suivante représente l'évolution du système en fonction du temps :

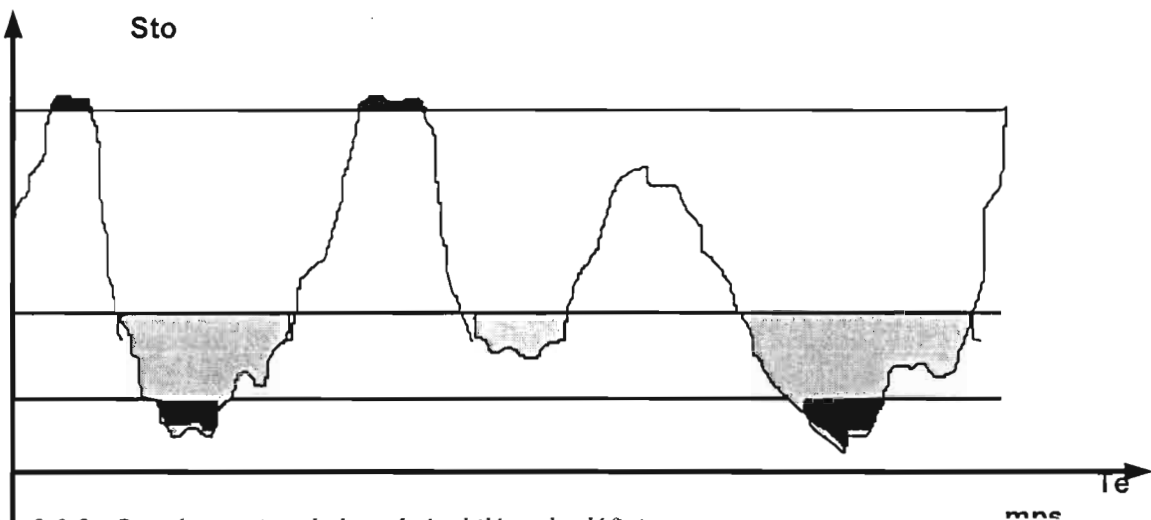


Fig. 2.3.2 : Représentation de la vulnérabilité ou le déficit

Soit donc :

$$Vdfs = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (S(NC1) - S_t) \quad \text{pour } S_t \leq S(NC1)$$

$$V_{bns} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (S(NC2) - S_t) \quad \text{pour } S_t \leq S(NC2), N : \text{nombre d'années de simulation}$$

et

$$V_{dev} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (S_t - S(NC3)) \quad \text{pour } S_t \geq S(NC3)$$

La performance d'une règle de gestion par rapport à une autre est estimée à partir d'une comparaison entre les valeurs d'un même indice de performance calculé pour chaque règle, et pour deux événements dommageables

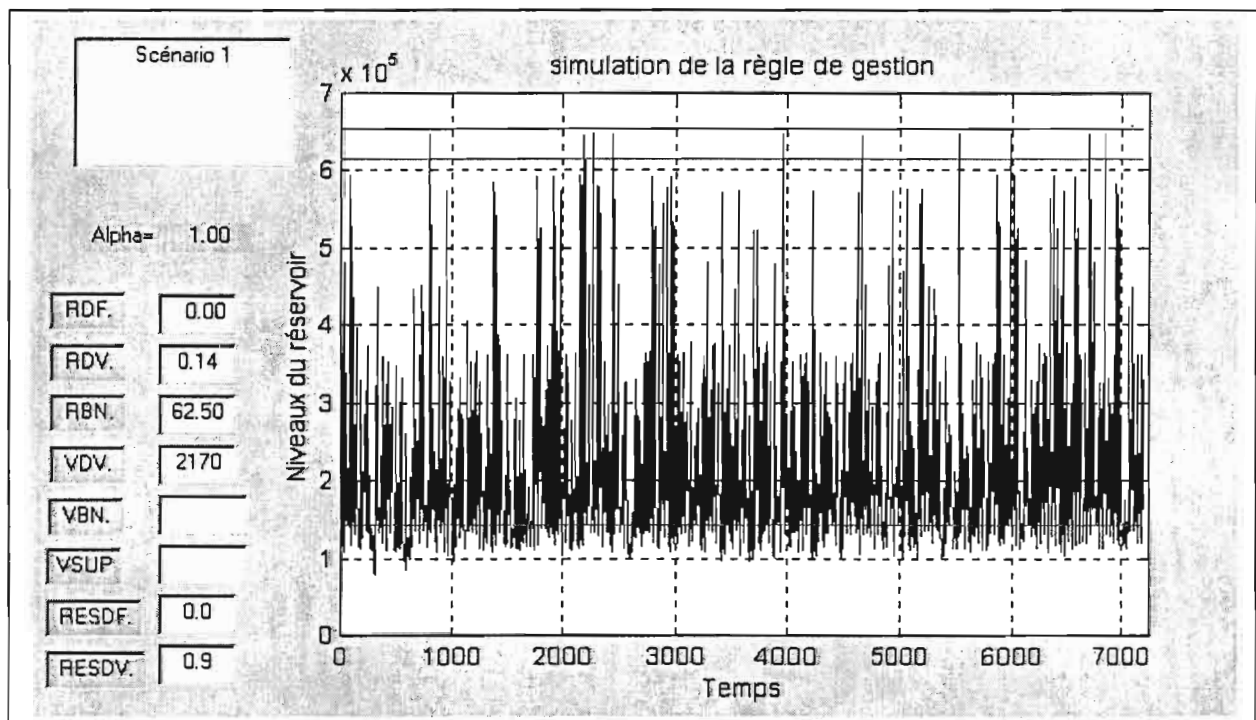
## SIMULATION PAR ANALYSE DE CRITERES

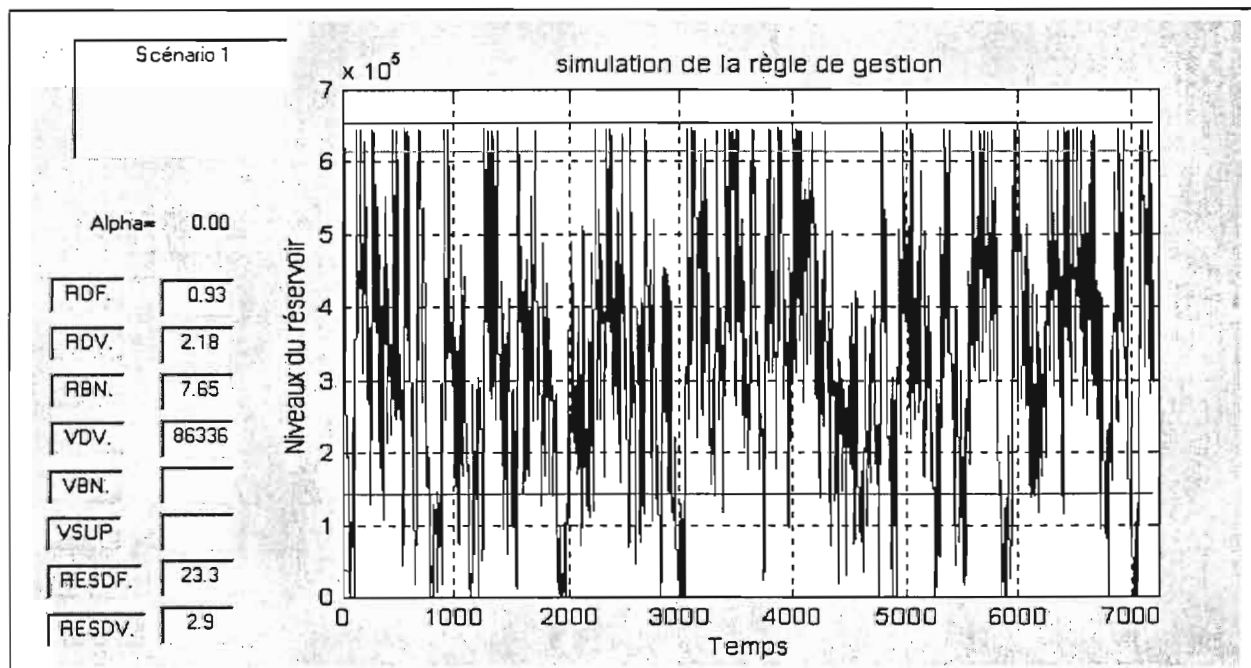
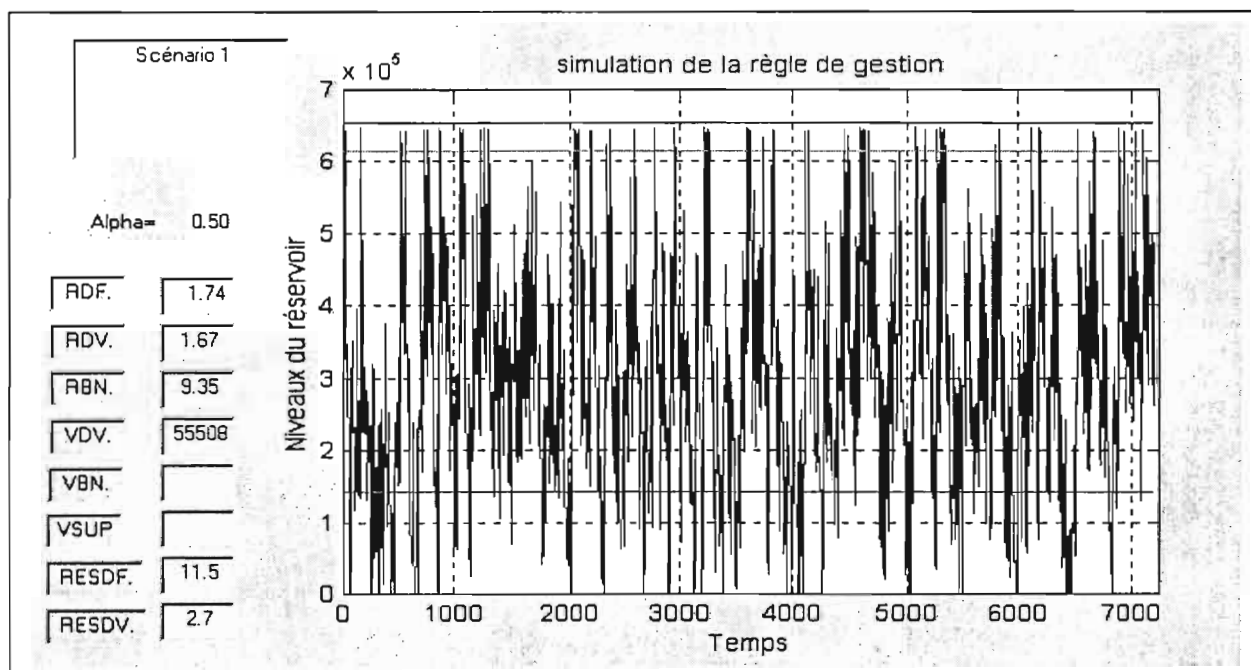
Dans le cas d'El Morra, nous avons choisi les indices suivants par simulation des règles optimales sur les 24 années de données hydrologiques générées ::

- risque de défaillance (RDF), de déverse (RDV) et de non satisfaction de la demande (RBN),
- vulnérabilité de défaillance (VDF), de déverse (VDV) et de non satisfaction de la demande (VBN),
- résilience de défaillance (RESDF) et de déverse (RESDV),
- lâchers de l'eau en plus de la demande (eau non utilisée et en surplus) : VSUP

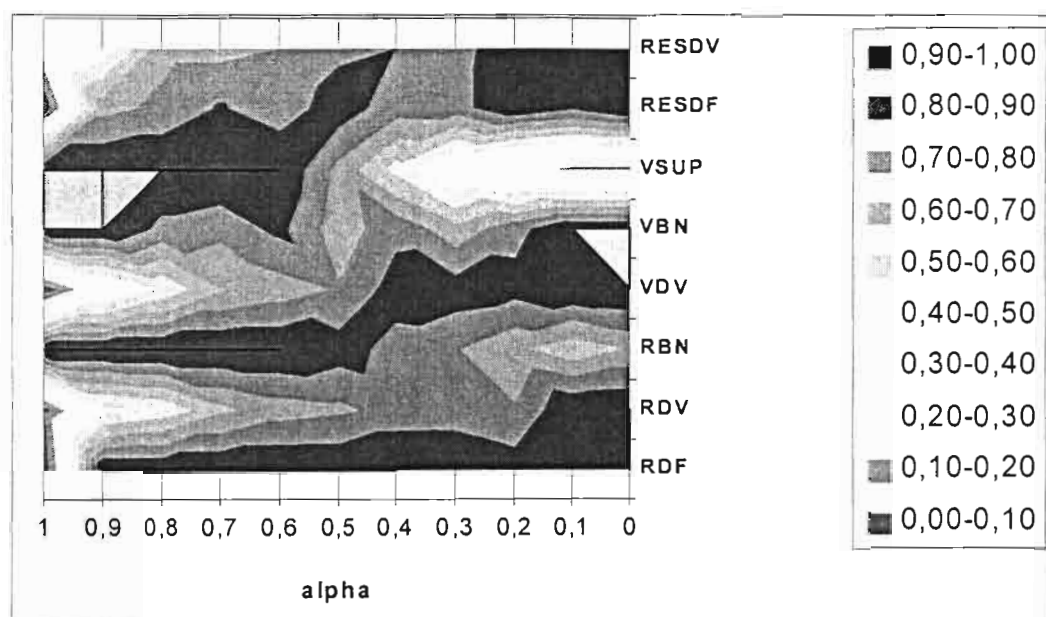
Ces indices sont tous normalisés entre 0 (très bonne performance) et 1 (très mauvaise performance) par un seuil de d'acceptabilité et sont regroupés ci-après en fonction de alpha :

$$\text{Indice normalisé} = (\text{indice} - \text{seuil acceptable}) / (\text{seuil inacceptable} + \text{seuil acceptable})$$



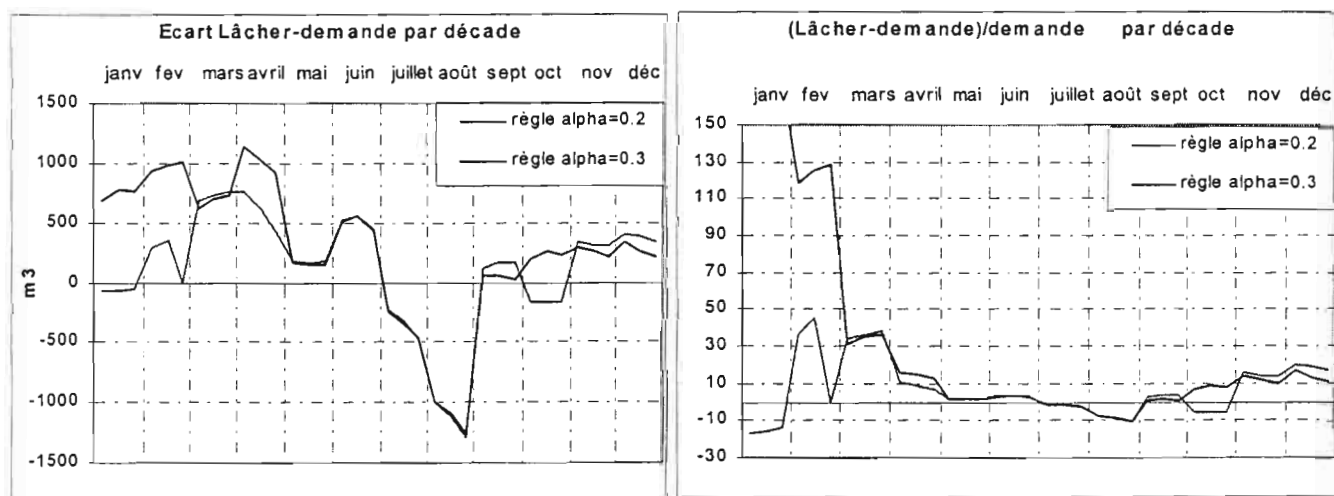


Pour simplifier l'interprétation des résultats, le graphique ci-après illustre les composantes : alpha, les indices et leurs valeurs. Lorsque la règle a un indice normalisé au delà de 1, elle est rejetée. Deux règles optimisées sont donc acceptables par rapport aux seuils des indices fixés (alpha = 0,2 et 0,3).



### Résultats et perspectives

Au de ces résultats, il reste finalement peu de possibilités au gestionnaire pour éviter des incidents qu'il juge inacceptable ( $\alpha = 0,2$  ou  $0,3$ ).

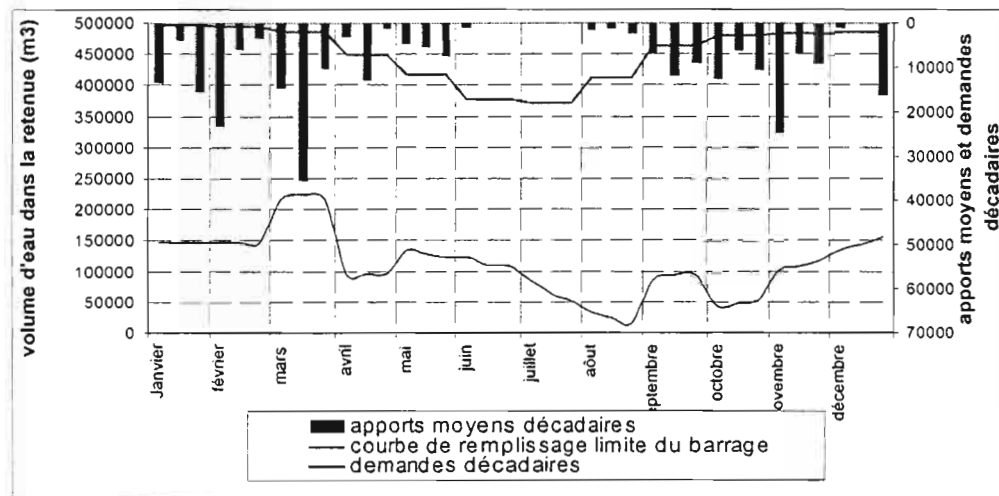


Dans les 2 cas, les défaillances de fourniture sont faibles et le choix de ces coefficients montre que le gestionnaire a tout intérêt à donner un poids préférentiel aux demandes agricoles pour satisfaire le double objectif qu'il s'est fixé. De mai à août, les deux règles de gestion ( $\alpha=0,2$  et  $\alpha=0,3$ ) satisfont la demande de la même manière. En revanche, elles diffèrent de janvier à avril. La règle ( $\alpha=0,3$ ) donne toujours un surplus d'eau, sauf durant les mois secs (juillet-août). La règle ( $\alpha=0,2$ ) est plus proche d'un déficit moyen nul (moins de surplus d'eau) et présente un léger déficit en octobre (semis). Cependant ce déficit a une valeur absolue faible ( $\leq 300 \text{ m}^3$  par décade), soit  $12,5 \text{ m}^3$  par hectare et par jour, ce qui représente  $0,125 \text{ mm}$  par jour ( $\leq$  limite de précision des valeurs de la demande en eau). Le choix n'étant pas évident entre les deux règles, on s'oriente vers celle qui est la moins pénalisante globalement (moins de déficit par décade, somme des indices normalisés minimal), soit la règle ( $\alpha=0,3$ ).



## RESULTATS DE LA GESTION OPTIMISEE DU BARRAGE COLLINAIRE EL MORRA

### Détermination de la courbe de remplissage



## CONCLUSION

Cette règle de gestion sélectionnée est basée sur une fonction objectif donnant un poids de 0,3 à la garantie d'un stock minimal dans le barrage ( $213000\text{m}^3$ ) et un poids de 0,7 à la satisfaction de la demande. La discrétisation des apports et du stock font que les lâchers se font selon cette unité de la classe ( $3000\text{m}^3$ ). Lorsque la lâchure est nulle et que le niveau de stock est supérieur au niveau objectif fixé égal à 50% de la médiane des apports ( $213000\text{m}^3$ ), une correction devra être apportée pour rapporter la lâchure aux valeurs faibles de volumes d'eau éventuellement demandées. Cette correction est annulée si le niveau de stock est inférieur au niveau minimum correspondant au volume de la demande de la période de pointe ( $142600\text{m}^3$ ). A partir de là, la matrice faisant correspondre pour chaque décade, le niveau de stock à une valeur de la décision de lâchure fait ressortir une ligne objectif (dite de remplissage) qui délimite les niveaux de stock par décade où la demande est totalement satisfaite.

Le risque maximum de défaillance est de 1,41%, le risque de déverse est de 2,12% et le risque de demande non satisfaite à hauteur de 60% de sa valeur est de 11,1%. La vulnérabilité maximum de déverse est de  $70000\text{m}^3$ , de demande non satisfaite est de  $6000\text{m}^3$  et de lâchures non utilisés est de  $42000\text{m}^3$ .

Ces résultats restent tributaires des erreurs des incertitudes des données qui sont à leur origine : apports reconstitués avec une tolérance d'erreurs, demande en eau estimée et fixe par décade, lors de l'optimisation et de la simulation des règles de gestion

Toutes ces approches sont concentrées sur la production et la constitution de la ressource en eau ainsi que sa variabilité, en revanche les demandes sont considérées comme des données déterminées par des scénarios pré-établis toujours à peu près satisfaites.

Lorsque le déficit offre/demande est structurel, la gestion de la ressource devient une gestion de la pénurie et dans ce cas, les solutions proposées par les calculs précédents ne sont plus valables notamment dans le domaine de la demande en eau agricole.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

PARENT.E, LEBDI.F et HURAND.P, 1992. Strategic operation of a water resource system : application to the NESTE water resource system. Revue des Sciences de l'EAU, 4(1992) 543-568

- RICHARD D., TURGEON A., 1988. Analyse de contraintes probabilistes dans la gestion d'un système hydroélectrique. *Revue des sciences de l'eau*, 3 : 171-178
- ROY B., 1985., Méthodologie multicritère d'aide à la décision. *Economica*
- SIGVALDSON O.T., 1976. A simulation model for operating a multipurpose multireservoir system. *Water Resources Research*, 12 (2) : 263-278
- SNIEDOVITCH, M., 1979. Reability constrained reservoir control problems: 1. Methodological issues. *Water Ressources Research*, 15 (6): 1574-1582.
- SNIEDOVITCH M., 1980. A variance constrained problem. *Water Ressources Research*, 16 (2): 271-274.
- SZIDAROVSKI F., DUCKSTEIN L., 1986. Dynamic multiobjective optimisation: A framework with application to regional water and mining management. *E. J. O. R.*, 24: 305-317.
- THOMAS A., REVELLE R., 1966. On the efficient use of hight Aswan dam for hydropower and irrigation. *Management Science*, 8 (4).
- TURGEON A., 1980) Optimal operation of multireservoir power systems with stochastic inflows. *Water Ressources Research*, 16 (2): 275-283.
- WASIMI S.A., KITANIDIS P.K., Real time forecasting and dauly operation of a system of reservoir under flood conditions using linear quadratic gaussian stochastic control. *Water Ressources Research*, 19 (6): 1511-1522.
- YAKOITZ S., 1982. Dynamic programming applications in water ressources. *Water ressources Research*, 18 (4): 673-696.
- YACIZIL H., HOUCKS M., TOEBES G.H., 1983. Daily operation of amultipurpose reservoir system. *Water Ressources Research*, 19 (1): 1-13.
- YEH W.W.G., 1985. Reservoir management and operations models: a state of art review. *Water Ressources Research*, 21 (12): 1797-1818.



# INTEGRATED MANAGEMENT OF WATER RESOURCES IN THE ARID AND SEMI-ARID REGIONS OF THE MEDITERRANEAN BASIN

Khourri J.

*Director, Water Resources Division, The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands*

## INTRODUCTION

The eastern and southern Mediterranean region encompasses Arab countries that lie essentially in semi-arid zones and many areas pass rapidly into arid and hyper-arid climatic environment. The greater part of the Arab region, which occupies some 14 million square kilometers, falls under the influence of the Mediterranean climate.

Water scarcity is indicated by estimating potential specific water availability per unit area or Per capita. The resource availability per unit area is about 100 000 m<sup>3</sup>/year per Km<sup>2</sup>. The average for the continents is 316 000 m<sup>3</sup>/year/Km<sup>2</sup> and for Asia and Africa is 310 000 and 134 000 m<sup>3</sup>/year/Km<sup>2</sup> respectively. The population in the region has increased from about 78 million in 1950 to 292 million in 2000, thus water demand has increased nearly 4 times, due to improvement in the quality of life and adoption of the food security concept. Water crises are likely to emerge and may attain serious proportion. Fortunately most countries with Per capita water availability less than 500 m<sup>3</sup> in the Arab region are high income countries. Availability of adequate financial resources and energy supplies has enabled these countries to build large desalination facilities for alleviating water supply shortages. This has represented an emergent management option for addressing increasing water scarcity. However desalination in high income Gulf countries (with high water stress), produce now about 2.3 BCM and desalination capacity is expected to increase 3 BCM in the year 2010 (ESCWA, 1999).

There is a growing recognition at the present day that integrated management of water resources is urgently needed in all regions of the Arab World. The integrated approach should encompass conventional and non-conventional resources. The former include inflow from humid catchments within or beyond the boundaries of the Arab regions and local runoff generated in wadi systems in the arid and semi-arid zones.

Since groundwater is a well-suited resource to arid regions, the recharge of groundwater systems can provide an important and appropriate resource. Non-renewable water resources occurring extensively in the Sahara constitute a strategic reserve. The concept of a holistic management of the region's finite resources and the integration of sectorial water plans within the framework of national economic and social policy need to be further developed to achieve sustainable development. The paper highlights the terms of action towards future development policies and their operation and putting them into practice.

## HYDROLOGY

The greater part of the Arab region falls under the influence of the Mediterranean climate. Precipitation throughout the region is controlled by the Mediterranean air circulation patterns.

The region is dominated by dry climate. It varies in its greater part from semi-arid to hyper-arid. The hyper-arid "Sahara" extends almost uninterrupted from the Atlantic ocean coastline in Mauritania and Morocco in the west to the Gulf coastal plains in the east. The semi-arid zones comprise the steppes that extend along the Mediterranean coast. The region is affected primarily by three main dominating pressure systems: The Siberian anticyclone, the monsoon Arabic low and the Azores high-pressure.

Rainfall generally decreases from north in the coastal zone to south in the interior desertlands. In the eastern Mediterranean precipitation decreases, generally, from west to east. Rainfall is high over the coastal mountains of Syria and Lebanon. It decreases from 1500 mm/Yr. on the high Lebanon mountain belt west of the rift system to about 800 mm/yr. on the Anti-Lebanon mountain ranges east of rift zone. Rainfall decreases also southwards to about 400-500 mm/yr in Jordan (Fig. 1).

In the Maghreb, a similar precipitation regime exists in the Atlas Mountain Ranges over the coastal Rif-Teli Atlas. Precipitation reaches 1800 mm/yr in Morocco and 1500 mm/yr in Algeria and Tunisia. It decreases southwards over the high plateau and Sahara Atlas to about 500 mm/yr and on the slopes adjacent to the Sahara rainfall drops to 100-200 mm/yr (Fig. 1).

In the hyper-arid belt precipitation decreases from west to east, reaching in the eastern Sahara as low rainfall as less than 10 mm/yr. The Ahgar and Tibesti highlands in the center of the Sahara are characterized by somewhat higher precipitation (up to 100 mm/yr).

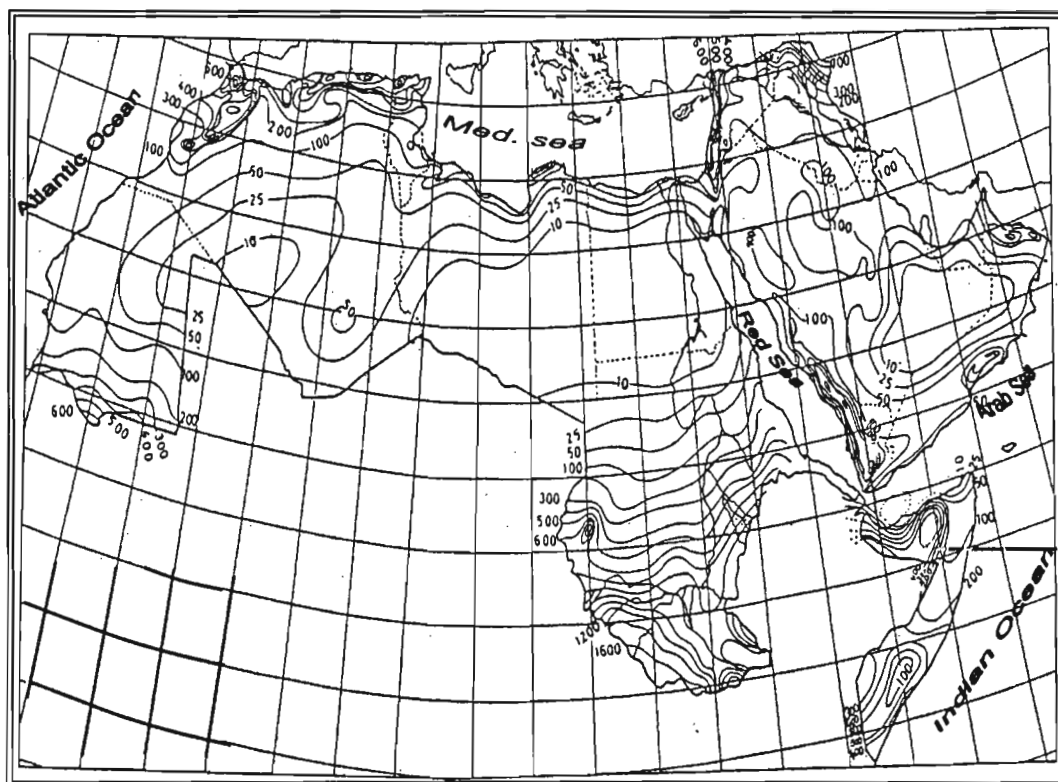
The coefficient of rainfall variation, C.V., in the Mediterranean arid and semi-arid region ranges from 25 to 50%, while it varies from 30 to 50% in Sudan, Mauritania and Somalia. In drier areas the coefficient exceeds 100%. Under moderate climatic conditions a single value ranges from 75% to 125% of the average with a 95% probability i.e at the rate of 15 years in every 20 years. However, in the drier regions the range between the maximum and minimum annual precipitation exceeds the above values, also the probable distribution diverges more from the uniform distributions. Needless to say that the drier regions may have several years without any rainfall.

In the Sahara, it was shown that rainfall intensity is of primary significance in the generation of surface runoff. It has been demonstrated that intensities of about 30 mm/hr can cause floods in the Ahggar (Algeria) even if rainfall depth is as low as 5 mm. Detailed studies of rainfall-runoff relations in semi arid zones were carried out in central Tunisia (Dutcher and Thomas, 1967). It was shown that the pattern of runoff follows closely the pattern of precipitation. Hydrographs of selected wadis show several distinctive streamflow characteristics of which the most pronounced are the sharp peaks, representing the storm flow.

Available records indicate that the streams draining the mountain ranges of northwest and central Tunisia have high maximum flash flood runoff and negligible flow in rainless periods. These characteristics suggest that much of the rain falls on relatively impermeable surfaces, because there is evidence of very little release from (and therefore of infiltration to) groundwater reservoirs.

In contrast to wadis draining impermeable terrains the greater part of flow of wadis draining carbonate massifs such as the Lebanon, Anti-Lebanon (Syria) and Ajloun Mountains (Jordan) come from groundwater. The annual runoff of wadi Barada in Syria is estimated at 441 MCM. Of this amount some 346 MCM or about 80% is groundwater discharge.

The evolution of the water resources in the region has been towards water scarcity and in certain parts toward extreme scarcity, marginal sources, Grey water, brackish and saline water are therefore considered real or potential water resources (table 1), the decrease of the cost of desalination of brackish water has given increased attention to this resource. At the present all possible, existing and potential water resources are assessed and taken into account in water policy reviews.



*Fig 1 Annual Precipitation in the Arab Region (mm)*

## **WATER RESOURCES AND WATER DEMAND**

1988). It is clear from the above that the coefficient of variation of the annual precipitation over a certain point, is inversely proportional to the average annual rainfall.

Evaporation from free water surfaces along the southern and eastern coasts of the Mediterranean ranges from 150 to 1000 mm/yr (ACSAD-UNESCO-IIHEE, 1988). This value increases inland to about 2000 mm/yr, while in the desert areas of North Africa it reaches 3000 mm/yr. In the Arabian Peninsula and Gulf region evaporation is about 2500 mm/yr. The value of 2000 mm/yr is considered to represent the average evapotranspiration in the Arab region.

Renewable water resources in the region have been estimated at 265 Billion Cubic Meters (ACSAD, 1997). Of this total 225 BCM is surface water and 40 BCM groundwater. Inflow of surface water from adjacent regions (mainly via the Nile, Euphrates and Tigris) is about 139 BCM, whereas runoff general within the region is estimated at 86 BCM. Updated assessment indicates lower values (Table 1). Total resource is 260 BCM of this total groundwater recharge is estimated at 36.5 BCM. Thus if groundwater recharge is added to surface water, it is concluded that about 95% of rainfall is lost via evapo-transpiration.

TABLE 1 : Water Resources in the Arab Countries

Country	Conventional Water Resources(MCM)			Non . Conventional Water Resources(MCM)			Total
	Surface Water	Ground Water	Sub. Total	Desalination	Agricultural Drainage Reuse	Sub. Total	
Jordan	475	275	750	2.5	61	63.5	813.5
Syria*	4276	5075	9351		1965	1965	11316
Iraq	60850	2000	62850	7.4	1500	1507.4	64357.4
Lebanon	2500	600	3100	47.3	21.5	68.8	3168.8
Palestine	30	185	215	0.5	2	2.5	217.5
SUB-Total	68131	8135	76266	57.7	3549.5	3607.2	79873.2
U.A.E	185	130	315	405	108	513	828
Bahrain	0.2	100	100.2	75	17.5	92.5	192.7
Saudi Arabia	2230	3850	6080	795	131	926	7006
Oman	918	550	1468	47.3	21.5	68.8	1536.8
Qatar	1.4	50	51.4	131	33	164	215.4
Kuwait	0.1	160	160.1	338	30	418	578.1
Yemen	3500	1400	4900	9	52	61	4961
SUB-Total	6834.7	6240	13074.7	1850.3	392	2243.3	15318
Egypt	55500	4100	59600	31.7	4790	4821.7	64421.7
Sudan	26000	1000	27000	0.6		0.6	27000.6
Somalia	8160	3300	11460	0.1		0.1	11460.1
Djibouti	200	50	250	0.15		0.15	250.15
SUB-Total	89860	8450	98310	32.55	4790	4822.55	103132.55
Morocco	22500	7500	30000	1.2	350	351.2	30351.2
Algeria	13000	2000	15000	74.6	400	474.6	15474.6
Libya	397	650	1047	210	110	320	1367
Tunisia	2700	1940	4640	8.7	6	14.7	4654.7
Mauritania	5800	1500	7300	1.7	67.6	69.3	7369.3
SUB-Total	44397	13590	57987	296.2	933.6	1229.8	59216.8
Total	209222.7	36415	245637.7	2236.75	9666.1	11902.85	257540.55

Source : ACSAD 1997, ESCWA 1999.

\* Water Resources of Syria: Except Equitable and Reasonable Share from the Euphrates River and Tigris River

Per capita availability has decreased from about 3100 m<sup>3</sup>/year in 1950 to about 500 m<sup>3</sup>/year in 2025, at the national level water resources availability has dropped in 12 countries below the critical level 500 m<sup>3</sup>/year. Under such conditions of scarcity, not only intensive supply and demand management has been considered a fundamental need, but also a review of water sector policy is required when annual internal water resources are less than 1000 m<sup>3</sup>. Per capita water availability is considered a severe constraints on socio-economic development and environmental protection where water resource availability drops below 500 m<sup>3</sup> (Table 2).

TABLE 2: Evolution of Per-Capita Water Availability and Scarcity Conditions

Country	Population			Per-Capita Water Availability			Water Scarcity 2000
	1950	2000	2025	1950	2000	2025	
Kuwait	152	2166	2721	1281	74	59	Extreme
Palestine	1258	2859	5987	171	75	36	
Qatar	250	579	779	206	89	66	
U.A.E.	97	2442	3284	4500	129	96	Severe
Jordan	1237	5003	9620	606	150	78	
Libya	1029	6562	11871	1017	160	88	
Bahrain	116	613	789	864	164	127	
Djibouti	256	991	1962	977	252	128	Very High
Yemen	4316	18654	44036	1135	263	111	
Saudi Arabia	3201	21930	54030	1900	277	113	
Algeria	8753	32362	48811	1714	464	308	
Tunisia	3530	9480	12899	1314	489	360	
Syria	3495	16125	26292	2676	580	356	High
Oman	456	2518	5020	3219	583	293	
Sudan	9190	33064	55553	2938	817	486	
Egypt	21834	68523	96462	2730	870	618	
Lebanon	1443	3282	4400	2148	945	705	
Morocco	8953	28781	38969	3351	1042	770	Moderate
Somalia	3072	10916	19802	3730	1050	579	
Iraq	5158	23280	43482	12185	2700	1445	
Mauritania	825	2327	4444	8848	3137	1643	

The volume of water utilized for agriculture in the present year is estimated at 188 BCM or 94% of total water use from conventional sources. Anticipated water demand for the 2025 is 320 BCM. Agricultural demand is about 300 BCM, far exceeding potential supplies. It is concluded that available water resources cannot satisfy exploitable water resources (accessible water resources) past the year 2000.

With increasing awareness about environmental issues during the past decade many countries have initiated activities relating to environmental impacts of water resources assessment. Water quality management has been emphasized in modern national water legislation. Due to ineffective enforcement, water quality has continued to deteriorate in many areas.

## WATER SECURITY: A STRATEGY TO ACHIEVE SUSTAINABILITY

Focus in the past decades has been on sustainability. The World Commission on Environment and Development (The Brundtland Commission) was concerned about how our actions today will influence the ability of future generations to meet their needs. Water resources development and management of, it is to be sustainable, must be compatible with limits and processes underlay natural water systems (Loucks, 1994). These processes could be environmental, ecological or hydrologic. Sustainability requires integration.



Integrated water resources development and management must interact with other sectors of economic and social activity. This entails managing the “whole range of development activities within a framework limited by the finite nature of the resource and optimizing the development strategy in terms of supply management, demand management, social equity economic and environmental sustainability and natural capacities (ICWE, 1992).

There are two important factors that influenced water policies in the past two decades (1980s and 1990s). These are “Food security” and “Water security”. The Food security programme was launched in the late 1970s, whereas the water security programme was developed in the late 1980s (Khouri, et al,1986). About one decade separated the adoption and implementation of these programmes which were regarded as principal components of Arab League paramount strategies.

In most Arab countries the large allocation of water to agriculture has been driven by a strategic aspiration to attain food self-sufficiency at the national level (Sadik and Barghouti, 1993). Water policies, which were designed at the national level, have resulted in a continuous exhaustion of the naturally available water resources. The food security programme however aimed to enhance agricultural development in the Arab region, on the basis of studies of the “relative preference or distinction” of each area in the region in respect to climate water availability soil and other factors susceptible to yield maximum crop production per unit area under prevailing conditions (ESCWA, 1999).

During the 1980s, there has been a growing concern about the adverse impacts of water resources development. Groundwater which constitutes about 25% or more of the resource in most countries has been over-exploited in almost all localities. Groundwater development has undoubtedly provided great economic benefits during the second half of the 20<sup>th</sup> century and contributed significantly to food security and to urban or rural water supplies. Intensive use of groundwater for irrigation, has, however, resulted in serious consequences.

On the basis of 1986 comprehensive water resources assessment at the regional level and impact assessment of water resources development, ACSAD launched the Arab water security as a national and regional strategy for the period 1985-2030. The concept were highly appreciated by Arab countries meeting in Kuwait in 1986, A statement on Arab Water Security was issued by ACSAD, AFSED and KFED the organizers of the First Arab Symposium on Water Resources and Use in the Arab World.

The concept was simple, the main objective has been to balance water demand and water availability. Accordingly the new strategy favors sustainability. The concept of water security has to address, therefore, sustainability issues, to achieve a balance between water resources and water demand, under conditions of water scarcity. Demographic, natural, social, economic and political factors interact to create often-unfavorable environment for sustainability. The challenge require a new vision and innovated approach, working with and not against the natural behavior of water.

Unfortunately it is rather difficult to design effective means of integrating environmental concerns at the national policy levels. Generally priorities for water allocation are accorded to domestic use, agriculture and industry, in descending order. Allocations among categories, however, is a political decision (Sadik and Barghouti, 1993) reflecting the broader, social economic and environmental objectives that water as a national resources should properly serve. For achieving these broad objectives it is imperative that the main responsibilities of water resources management with the state lie. The capabilities of government institutions need to be continuously developed and enhanced to enable them to undertake effectively and efficiently the functions of water resources development and management within a framework of policies, regulations and procedures.

Looking ahead to the first decade of the 21<sup>st</sup> century, four major components are proposed to meet the goal of water policy which endeavor to achieve water security in the third millenium. These components of Arab regional water strategy are based on analysis of sustainability issues, potential problems, present and future needs. Fulfillment of the national targets entail a variety of actions in all strategy components.

The envisaged strategy components comprise:

- (1) Review of water policies
- (2) Development of governance
- (3) Planning sustainable water systems
- (4) Integrated water resources management

## **Review of Water Policies:**

A structural approach to a policy review based on critical sustainability issues and quantified pressures on the water system, has to be developed. Actions and measures to be taken to address over-development are country-specific, but guiding principles for policy review could be developed at the sub-regional or regional level. Water security is now high in the agenda. As regards food security, various scenarios have been developed at the national and regional level. Water resources institutions have realized that a pre-requisite to policy review and development is a continuous assessment of resources and demand. Matching supplies and demand is a basic issue for planning future withdrawal, but there are other issues that need to be addressed; Water pollution and depletion of aquifer storage need an urgent action, because of their threat to human health and sustainable development.

Kuwait and Saudi Arabia offer extreme cases on water policy formulation. In Kuwait (Per capita 74 m<sup>3</sup>), groundwater of the Dammam and Quaternary aquifers could only be used to blend desalinated water for urban water supply. Agriculture could re-use treated wastewater. Saudi Arabia (Per capita 250 m<sup>3</sup>) adopted in the past decade a water policy based on food self-sufficiency. The cultivated areas increased from 400 000 ha in 1971 to 1.6 million ha in 1992. The wheat production reached 4.25 million tons exceeding national demand. The estimated total water withdrawal increased from about 1.85 BCM in 1980 to 28.8 BCM in 1992. Irrigation water use was about 10 BCM. Water mining was estimated at 28 BCM.

Recognizing the large gap between water availability and water uses and realizing that they are exporting "mined water", and that "Virtual water" is a precious water exported at minimal value, subsidies were reduced in 1993. The result was a reduction of wheat cultivated areas by 325000 ha. Water levels recovered by 20 to 30%. Measures to manage water demands were also taken in Urban areas.

## **Development of Governance:**

Governance is defined as "a framework of social and economic systems and legal and political structures through which humanity manages itself" (What 2000). In arid and semi-arid zones special emphasis is placed on appropriate mechanisms and instruments to administer water activities. Recent trends focus on greater participation more transparency and cohesion and on a new approach for re-organizing the water sector. In the east and south Mediterranean countries, current approaches include de-centralization corporitization and privatization in the form of mixed enterprise. Devolution to user groups at the grassroot and other levels exists in some countries. In Tunisia devolution to water user associations (WUAs) has been a success. By 1996 some 2000 WUAs were already in existence, managing irrigation perimeters and potable water supplies. Current policies aim to extend the creation of WUAs (GWP 2000).

In many countries there is some overlap of responsibility. Many functions are entrusted to various departments and institutions (co-ordination between agencies has not been mandated by water legislation, leading to mismanagement of water resources (ESCWA, 1999). A co-ordinating body needs to be established to frame the overall policy of the country direct the allocation of water, funds and manpower for different purposes. A priority need is to undertake action to implement effectively water legislation. Sound enforcement of water legislation is, however, country-specific.

In the south and east Mediterranean regions there are several international river basins and many regional aquifer systems. The Nile is shared among nine countries, the Euphrates and Tigris rivers are each shared between 3 and 4 countries respectively. As regard international groundwater resources, the Nubian aquifer system is shared between 4 countries and the Dammam aquifer in the Arabian Peninsula is shared between 6 countries. Few of shared water resources in the region are covered by treaties and conventions between some or all the revering states and co-basin countries. At the global level nearly 40% of the population of the world live in some 260 international river basins that each is shared by at least 2-3 countries.

Agreements for use of waters of international rivers are normally based on the Helsenki Rules and future agreements are expected to follow the provisions of the 1997. UN convention on the Law of the Non-navigational uses of International Water Courses. There is a growing need for a comprehensive legal instruments for international water bodies. Such agreements promote the equitable use of shared water resources.

## **Planning Sustainable Water Systems:**

Water systems, surface and groundwater in the Arab region are vulnerable systems and their resources are limited. As stated earlier water scarcity has become the general condition in most countries and population projection under criteria based on the most moderate and conservative, indicate sharp decrease of water availability by 2025. As water scarcity increases the implications can spread beyond country level and may

result in political destabilization. Conflicts or competition over resources of international rivers or aquifers can also increase tensions.

Many planners tend to equate sustainability with resources preservation. This concept cannot be applied to non-renewable water resources, since preservation policies would substantially limit the economic and social development of arid and semi-arid areas, currently depending on these resources for their continued development and welfare. Countries in the region have chosen to continue mining their resources at various rates. The central question is how much is used now and how much should be used in the future, recognizing that the future is important but uncertain. How should tradeoffs among various generations be made? Since future benefits, costs and losses when discounted to the present time decrease in value, any future loss far enough into the future will have minor effects on the present net benefits. Should our decisions today allow non-renewable water resources to be exhausted in the future, first because the future loss when discounted to today values is nil? Many would argue that the concept of discounting in benefit-cost analysis is valid, but that discounting should be applied with safeguards on the integrity of life-supporting resource such as soils, water and other ecological life support systems (Loucks, 1994).

Another issue needs to be addressed with regard to sustainable water systems in arid zones. It concerns the spatial dimensions and time scale of sustainability. Conditions of sustainability vary for specific regions. Over what period should we expect to permit decreases in overall welfare due to depletion of water resources. Current understanding of water systems in arid zones is far from ideal. Data collection networks are often unsatisfactory. In only few countries are reasonable comprehensive time-series data available for rainfall, runoff, groundwater levels and water quality. For the foreseeable future policy at all levels of governance will need to be made in a climate of uncertainty. The "precautionary principle" is, however, designed to avoid inertia. The principle states "where there are threats of serious or irreversible damage, lack of full scientific certainty should not be used as a reason for postponing measures to prevent environmental degradation".

### **Integrated Water Resources Development**

In the arid and semi-arid areas of the Mediterranean integrated management of resources must emphasize both supply and demand management including application of alternative technologies for freshwater augmentation, which include desalination, re-use of wastewater, water harvesting and aquifer recharge. The concept of integrated approach as applied to water resources management, focuses on giving due consideration to economic, social, environmental and engineering requirements during planning.

Recent development in this context is based on the application of a system approach and a diagnostic approach to address groundwater problems and minimize adverse impacts of water resources development (Khouri, 2000). The former concept would help to improve understanding of the relationship between different components of the hydrologic cycle and the environment, atmosphere, surface runoff, soil and groundwater. The latter approach seeks to improve planning and protection of the resource by a-priori assessments. These assessments evaluate the sensitivity of the groundwater systems to possible pressures in terms of quality and quantity and can therefore play an important role in improving environmental management.

There is a large potential in many areas for increasing the supply of water from rainfall water management. Rainfall water management deals with all methods, which augment precipitation, manage rainfall and runoff and store them in the soil or underground for later beneficial use. Rainfall water management techniques include precipitation enhancement, water conservation, development of wadi systems through rainwater harvesting in upper reaches and floodwater harvesting and artificial recharge in the lower reaches.

Supplementary irrigation could be introduced to stabilize the yields of rainfed winter crops through well timed applications of small amount of water. Response farming practices which aim at institutionalization of farmers role and incorporating information on rainfall expectations and crop response may produce immediate impacts (Khouri et al, 1997).

While planners should be aware of the possibilities of scientific breakthroughs, the scope for utilizing existing technological innovations for immediate effect is enormous; especially in the area of environment. The region should focus on modern technology for artificial recharge, watershed management and on improving macro-catchments in highlands where uncontrolled runoff contribute to heavy water and soil losses. The quest to conserve irrigation water should address the technological problems causing losses. Seepage, leakage, percolation, evaporation and unproductive evapotranspiration. These are the main causes of water losses in water distribution and application (Sadik, Barghouti, 1997). Water can be conserved through better on-farm and system management. Modern on-farm irrigation methods such as sprinkler and

drip irrigation can reduce water losses considerably. Efficiency rates of 70% for Jordan and 67% for Morocco are attributed mainly to the application of these methods (Sadik and Barghouti, 1993).

The strategy for risk management has to provide for short term solutions for the mitigation or prevention of damage from flood risks. As regard drought combat, long terms as well as short-term measures are required to reduce the negative impacts of drought. National drought policies should stress the creation of infrastructure to supply the basic data and research needed for assessment and response. A key part of the national policy should be the development of a general plan to prepare for and respond to drought episodes.

## REFERENCES:

- ACSAD, 1997. Water resources and their uses in the Arab world. Second Symposium on Water Resources and Uses in the Arab World. Kuwait 8-10 March, 1997.
- ACSAD-UNESCO-IIHEE, 1988. Water resources assessment in the Arab region, Paris-Delft-Damascus, 398p.
- DUTCHER, L.C., and H.E. THOMAS, 1967. Surface water and related climate features of the Sahil Susah area, Tunisia, Geological Survey, Water Supply Paper, 1757. F, Washington.
- ESCWA, 1999. Updating the assessment of water resources in the ESCWA member countries. Expert Group Meeting on Updating the Assessment of Water Resources in the ESCWA Member States. Beirut 20-23 April 1999. 147 p.
- KHOURI, J., 2000. An integrated and diagnostic approach to groundwater protection. Workshop on Management, Protection and Sustainable Use of Groundwater and Soil Resources in the Arab Region. ACSAD-BGR, Damascus 17-20 July 2000.
- KHOURI, J., AGHA, W.R. and DROUBI, A. 1986. Water resources in the Arab world, and future perspectives. Proceedings of the Symposium on Water Resources and Uses in the Arab World, February 17-20, Kuwait.
- KHOURI, J., AMER, A., and SALIH A., 1997. Rainfall water management in the Arab region, UNESCO/ROSTAS, Cairo, 1997. 146 p.
- LOUCKS, P. 1994. Water resources management, focusing on sustainability, UNESCO, Paris. IHP-IV population, 46 p.
- SADIK, A. K., and BARGHOUTI, S. 1997. The economics of water, Second Symposium on Water Resources and Uses in the Arab World. Kuwait 8-10 March 1997.
- SADIK, A.K., and BARGHOUTI, S., 1993. The water problems of the Arab world, Management of scarce resources, Harvard University Press. 1994.
- WMO, 1997. Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world. Commission on Sustainable Development Network.
- WORLD HUMANITY ACTION TRUS (WHAT), 2000. Governance for a sustainable future. Working with water. WHAT 2000, Russel Press LTD, Nottingham, U.K. 52 p.



# MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UN HYDROSYSTEME COTIER MEDITERRANEEN FORTEMENT ANTHROPISE : L'ILE DE CAMARGUE.

Chauvelon P. \*, Tournoud M.G. \*\*, Sandoz A. \*, Berceaux A. \*, Heurteaux V. \*

\* *Fondation Sansouire, Station Biologique de la Tour du Valat, Le Sambuc, 13200 Arles, France*

\*\* *Hydrosciences, UMR 5569, Univ. Montpellier 2, cc57 - 34090 Montpellier Cédex 5 France*

## RESUME

L'Ile de Camargue, partie centrale du delta du Rhône, constitue un hydrosystème complexe fortement anthropisé, associant un bassin versant agricole, des zones marécageuses, et des étangs saumâtres peu profonds dont la communication avec la mer est contrôlée. Cet ensemble est soumis à une forte variabilité hydrologique naturelle liée au climat méditerranéen et à un régime hydrologique artificiel imposé par la riziculture. Ainsi, l'objectif d'une gestion maîtrisée de l'eau dans cet hydrosystème impose de modéliser conjointement le fonctionnement hydrologique du bassin versant et la dynamique hydraulique du système d'étangs. La méthodologie utilisée est basée sur l'exploitation de données issues d'un SIG pour l'estimation des apports du bassin versant aux étangs, et elle couple successivement une approche déterministe (hydrodynamisme) et conceptuelle (modèle intégré pour la simulation globale du fonctionnement hydro - salin). Les importations d'eau sont traitées en fonction des évolutions de l'occupation du sol, dans une base de données géoréférencées. La méthode développée permet d'estimer la consommation moyenne par saison et pour chaque bassin d'irrigation. Les apports totaux du bassin versant sont alors estimés en utilisant les caractéristiques spatiales et de gestion hydraulique des zones contributives en comparaison à celles du bassin jauge de référence.

La dynamique hydraulique est étudiée à l'aide d'un modèle hydrodynamique 2D des circulations à l'intérieur du système des étangs et en relation avec la mer. Ce modèle envisage toutes les situations météorologiques de forçage (vent, niveau de remplissage, ...) pour appréhender la variabilité hydrodynamique du système lagunaire. Les résultats des simulations sont alors utilisés sous la forme de fonctions d'échanges hydrauliques dans un modèle conceptuel afin de simuler le fonctionnement sur de longues périodes, en utilisant une structure de modèle à réservoirs. Le pas de temps du modèle conceptuel intégré est le jour, mais les résultats de simulations en termes de niveau et salinité sont résumés au pas de temps mensuel.

## MOTS CLES

Modèle hydrologique conceptuel, hydrodynamisme, SIG, zone humide, riz, irrigation, Rhône.

## INTRODUCTION

L'Ile de Camargue, partie centrale du delta du Rhône (Figure 1), constitue un hydrosystème complexe à double titre. D'abord par le fait d'un bassin versant quasi-horizontal, aménagé pour l'agriculture (en particulier, la riziculture) et compartimenté pour sa gestion hydraulique, que ce soit au niveau de l'irrigation ou du drainage. Son système d'étangs (Figure 1): le Vaccarès et les Etangs Inférieurs : Monro, Malagroy, Impérial, Lion, Dame (le Fournelet, soumis à une gestion particulière, étant exclu de la modélisation) présente une géométrie compliquée. Ensuite, la circulation des eaux y est essentiellement induite par le vent et les échanges hydrauliques avec la mer, gérés au niveau d'un pertuis maritime équipé de vannes.

Cette complexité rend a priori difficile l'analyse du comportement hydrologique de cet hydrosystème, à la fois du fait de la complexité de la gestion de l'eau sur le bassin versant (Heurteaux, 1992, 1994), et de la grande variabilité des échanges avec la mer, du fait des interactions entre tous les forçages hydroclimatiques (vent, pluie, ...). Pour quantifier le bilan hydrologique à différentes échelles spatiales et temporelles, il faut mettre en place un modèle simplifié du fonctionnement de l'hydrosystème, à un pas de temps compatible avec sa dynamique temporelle, mais aussi adapté aux contraintes liées à la disponibilité

des données. Cette démarche modélisatrice doit prendre en compte les composantes naturelles et anthropiques majeures du fonctionnement du système:

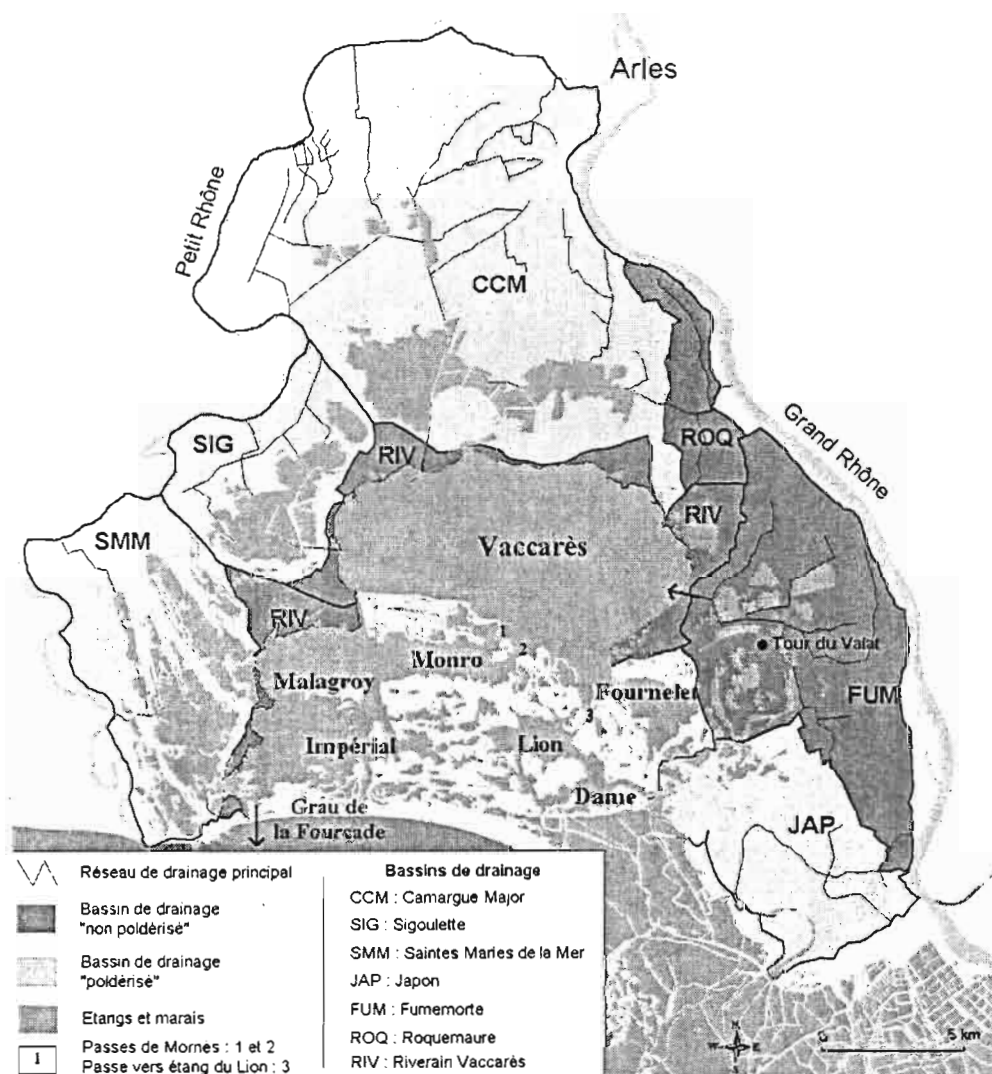


Fig. 1 : L'île de Camargue : les bassins et réseaux de drainages principaux et les étangs du système Vaccarès.

Les composantes naturelles :

- Apports des précipitations,
- Exportations dues à l'évapotranspiration,
- Effets du vent sur la dynamique du système aval,

Les composantes anthropiques :

- Importations pour l'irrigation des terres cultivées (riziculture),
- Echanges mer - étang contrôlés.

Le travail réalisé est essentiellement basé sur l'analyse des données existantes, lesquelles restent assez disparates et souvent imprécises dans une perspective de modélisation. L'essai de modélisation est réalisé sur une période récente (extraite de la série 1993 à 1997) pour laquelle la connaissance de l'occupation du sol est disponible, ainsi que les autres données (limnimétrie, hydrométrie). Le travail de modélisation comprend la génération de données à partir d'un SIG pour la quantification des apports du bassin versant, une modélisation déterministe de l'hydrodynamisme des étangs, et un modèle conceptuel intégrant les résultats des étapes précédentes pour simuler le fonctionnement de l'hydrosystème.

## **PRESENTATION DE LA DEMARCHE DE MODELISATION**

### **Un modèle conceptuel intégré**

Le modèle qui a été développé ici considère l'hydrosystème de l'Ile de Camargue comme un ensemble de compartiments en interactions :

Le bassin versant est une boîte noire dont le comportement est supposé homogène à celui du bassin du Fumemorte (seul bassin jaugé depuis 1993). On considère en effet que les débits des bassins autres que celui de Fumemorte sont directement fonction de leurs caractéristiques (superficie, occupation du sol, volume d'irrigation) relativement à celles du bassin de Fumemorte ;

Le système des étangs est assimilé à trois réservoirs parfaitement mélangés (un pour le Vaccarès, deux pour les Etangs Inférieurs). Ces réservoirs reçoivent les précipitations directes et les apports du bassin versant, sont soumis à l'évaporation, échangent des volumes d'eau et de sel entre eux et avec la mer.

Il est évident que l'influence de l'homme sur le fonctionnement hydrologique du système est un point crucial de la problématique de modélisation. Quelle que soit l'approche de modélisation choisie pour décrire les transferts d'eau dans l'Ile de Camargue, il est indispensable dans un premier temps de quantifier les entrées d'eau et leur distribution aux parcelles agricoles.

Cette première étape utilise les données agricoles de type foncier (position des rizières pour chaque saison culturale étudiée) et hydrauliques (secteur d'irrigation, bassin de drainage) à une résolution spatiale fine et traite ces données à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), ainsi que les données de débit du bassin du Fumemorte.

L'autre volet du travail consiste à mettre en œuvre un modèle hydrodynamique bidimensionnel pour définir la circulation des eaux dans les étangs dans différentes conditions de forçage de vent et de remplissage de l'étang. De cette modélisation sont extraits les résultats concernant les débits dans les passes (Fig. 1) entre les étangs. Les résultats de ces deux étapes de travail sont indispensables à la mise en place du modèle global de l'hydrosystème de l'Ile de Camargue.

### **Le pas de temps de la modélisation**

La modélisation hydrologique du bassin versant pendant la période rizicole n'est pas réaliste à un pas de temps inférieur au mois (Chauvelon, 1996), à cause de la grande variabilité des pratiques de gestion de l'eau des rizières (surverses, vidanges). En dehors de la période culturale, la modélisation du fonctionnement hydrologique du bassin versant peut être envisagée, à un pas de temps plus court : celui de l'épisode pluvieux. Cependant cette modélisation du fonctionnement hydrologique "naturel" du bassin versant reste délicate, étant donné le contrôle hydraulique aval par l'étang, qui peut provoquer le stockage temporaire de l'eau dans le réseau de drainage ou au contraire accélérer sa vidange selon que le basculement du plan d'eau s'effectue sous l'effet du mistral (secteurs N-NW) ou du vent de Sud Est.

Du point de vue hydrodynamique, les échanges entre les différents étangs du système Vaccarès sont influencés d'une part par le vent et d'autre part par la gestion du grau maritime. La variabilité du vent est très grande tant en vitesse qu'en direction. On peut donc difficilement envisager une modélisation de ce système à un pas de temps supérieur à la journée.

Le modèle conceptuel intégré aura donc un pas de temps de calcul journalier pour prendre en compte la grande variabilité du vent d'un jour à l'autre. Mais il faut garder à l'esprit que les résultats obtenus ne pourront qu'au mieux traduire la variabilité hydrologique mensuelle de l'hydrosystème de l'Ile de Camargue. Ils seront donc présentés et exploités comme tels.

### **Les variables élaborées d'entrée du modèle intégré**

#### **Quantification des entrées d'eau pour la riziculture sur le bassin versant.**

Le riz est cultivé sur des parcelles nivelées de 1 à 3 ha, délimitées par des parapets (lévadons), inondées pendant la période culturale (de mi avril à septembre) et drainées par un réseau de fossés et canaux. On dénombre dans l'Ile de Camargue 74 exploitations agricoles, alimentées par des stations d'irrigation privées, totalisant une centaine de pompes (Gindre et al., 1999). Les associations collectives d'irrigation totalisent 53 pompes, réparties dans 13 stations. Les volumes pompés durant la saison sont dérivés des caractéristiques des pompes, de jaugeages, de durée de pompage et/ou de consommation d'énergie. Etant donnée la variabilité des consommations d'eau à l'hectare de riz et l'absence d'un suivi de toutes les stations



d'irrigation, il apparaît indispensable de mettre au point une méthode permettant d'estimer les volumes d'irrigation à partir de la distribution spatiale des rizières et des caractéristiques des infrastructures hydrauliques.

Un préalable indispensable à la modélisation des apports du bassin versant est donc le développement d'une base de données géoréférencées gérée par un système d'information géographique (SIG), permettant d'estimer les entrées et la répartition de l'eau d'irrigation. La mise à jour de l'occupation du sol dans le SIG est réalisée à partir de l'imagerie satellitale.

La tendance à une augmentation du volume spécifique d'irrigation (VSI, volume d'irrigation par unité de surface) quand la superficie en riz diminue a été mise en évidence pour la majorité des périmètres d'irrigation (Chauvelon et al, sous presse). La méthode développée, utilisant des régressions entre VSI et superficie en riz par bassin d'irrigation, permet d'estimer les entrées d'eau annuelles de chaque bassin d'irrigation du bassin versant actif à partir de leur superficie en riz.

Le cas des stations privées sur le petit Rhône est particulier. En l'absence de quantification expérimentale du débit d'exploitation des pompes et sans connaître la véritable structure hydraulico-foncière, une méthode basée sur l'estimation des débits d'exploitation à partir des capacités de pompage maximales a été utilisée. Les capacités de pompage des stations et des périmètres adjacents dont les limites ne sont pas connues précisément, ont été regroupées.

L'étendue de variation et la valeur minimale du VSI est plus grande pour l'irrigation collective que pour l'irrigation privée (respectivement 2 100 à 5 000 mm, et 1 300 à 3 500 mm). On peut résumer la situation avec les valeurs globales obtenues pour l'Ile de Camargue (Tableau 1). Les chiffres ne concernent que la partie du territoire endiguée. La partie non endiguée, appelée ségonnal, c'est à dire la partie cultivée du lit majeur du fleuve, n'intervient pas dans le fonctionnement hydrologique du système Vaccarès, le drainage étant effectué directement vers le Rhône.

TABLEAU 1 : Estimations des volumes d'eau introduits dans l'Ile de Camargue (intra digue) pour la riziculture, et des superficies cultivées en riz.

ANNEE	1993	1994	1995	1996
Volume d'irrigation (M m <sup>3</sup> )	362	343	342	296
Surface en riz (ha)	14 185	13 171	12 304	11 066

### Les échanges avec la mer par le grau de la Fourcade

L'estimation des chroniques de débit échangés entre la mer et les étangs inférieurs par ce grau est indispensable pour deux raisons,

- d'une part, pour calibrer le modèle hydrodynamique et le modèle conceptuel intégré.
- d'autre part, dans l'étude des migrations piscicoles, qui sont conditionnées par les vitesses d'écoulements dans le chenal et au niveau de l'ouvrage hydraulique.

Le pertuis de la Fourcade est un ouvrage composé de 13 vannes coulissantes, au travers de la digue maritime, qui sont manœuvrées manuellement. Les critères de gestion sont relativement simples :

- en automne, sept à treize vannes sont généralement ouvertes par vent de secteur nord (mistral) pour abaisser le niveau des étangs par vidange vers la mer ;
- à la fin de l'hiver et au printemps, pour favoriser le recrutement piscicole, une ou deux vannes (jusqu'à sept en 1997) sont ouvertes de février à juin, généralement pendant la nuit.

Connaissant le nombre de vannes ouvertes (noté sur les relevés du garde-vannes) et la différence de niveau entre l'étang de l'Impérial et la mer, l'application d'une relation hydraulique simple permet de calculer le débit échangé par le pertuis. Ces calculs ont été conduits sur les années 1993 à 1998 (figure 2). La priorité étant donnée au maintien d'un niveau du plan d'eau acceptable par tous les usagers, les échanges hydrauliques avec la mer sont nettement dominés par les sorties d'eau (jusqu'à plus de 1,5 millions de m<sup>3</sup> par jour au mois de janvier – février si les étangs sont remplis et le mistral souffle). Les périodes pendant lesquelles des entrées marines significatives se produisent sont beaucoup moins fréquentes, mais permettent le recrutement piscicole.

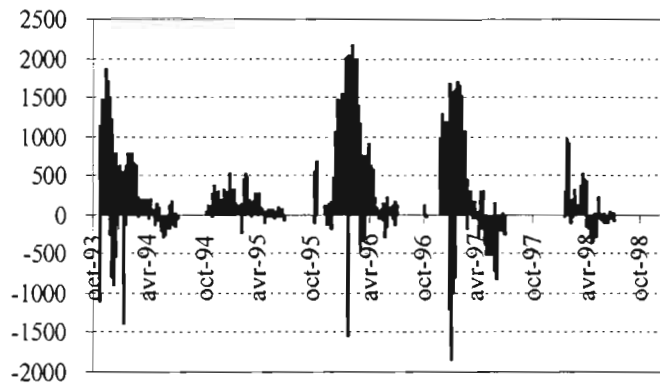


Fig. 2: Estimations du débit journalier au grau de la Fourcade (en milliers de  $m^3$ /jour), les débits sont signés positivement quand l'eau sort de l'étang.

### Les échanges entre les étangs

Un modèle hydrodynamique a été mis en œuvre pour étudier l'impact du vent et de la mer sur les importations ou les exportations d'eau saumâtre dans le système des étangs du Vaccarès.

La démarche de modélisation adoptée repose sur les hypothèses suivantes :

- la circulation des eaux s'organise principalement dans le plan horizontal ;
- les principales variables qui conditionnent ces écoulements sont dans l'ordre d'importance : le vent, l'ouverture des vannes à la mer, les pompages mis en place pour l'évacuation rapide des eaux (par exemple dans le cas de l'inondation d'octobre 1993) et les entrées du bassin versant (lesquelles furent également exceptionnelles à l'automne 93);
- le niveau moyen de remplissage de l'étang est un paramètre important dans les échanges entre le Vaccarès et les Etangs Inférieurs.

La mise en place du modèle hydrodynamique bidimensionnel aux éléments finis (près de 5000 éléments et plus de 2000 nœuds pour la constitution du maillage) nécessite de renseigner toutes les informations relatives à la géométrie du domaine de simulation. Il s'agit en particulier de la bathymétrie du site, mais aussi de la topographie des îles et des berges, qui peuvent se couvrir d'eau ou être à sec selon les conditions de remplissage de l'étang et/ou l'épisode de vent considéré. La géométrie des graus et de leur débouché en mer est également nécessaire.

Les **variables d'entrée** du modèle **hydrodynamique** sont toutes les valeurs des variables dites forçantes, qui vont conditionner les écoulements. Parmi ces données figurent :

- les conditions de vent (en vitesse et direction),
- l'état du grau à la mer (ouvert ou fermé),
- le niveau de la mer (si le grau est ouvert),
- les débits apportés du bassin versant par les principaux canaux,
- éventuellement la pluie et l'évaporation.

Les **variables de sortie** sont constituées de cartes du champ de vitesses et du champ des niveaux du plan d'eau, après différentes durées de simulation. Ces sorties sont traitées pour obtenir les informations souhaitées ici, en particulier les débits d'échange entre le Vaccarès et les Etangs Inférieurs pour différentes conditions de forçage.

Plus de soixante simulations ont été réalisées. Elles prennent en compte divers scénarii de niveau de remplissage, de débits en provenance des bassins, de force et direction du vent.

On remarque que l'importance des apports du bassin versant (en dehors de situations exceptionnelles telle que celle de l'automne – hiver 93 - 94) n'a que peu d'influence sur les débits dans les passes. Une direction de vent et un niveau de remplissage donnés imposent le niveau d'eau dans la passe et la vitesse du vent conditionne la vitesse moyenne des échanges. Les résultats ont donc été interprétés par des relations entre la vitesse moyenne d'échange et la vitesse du vent, pour chaque direction de vent considérée, indépendamment du niveau d'apport du bassin versant.

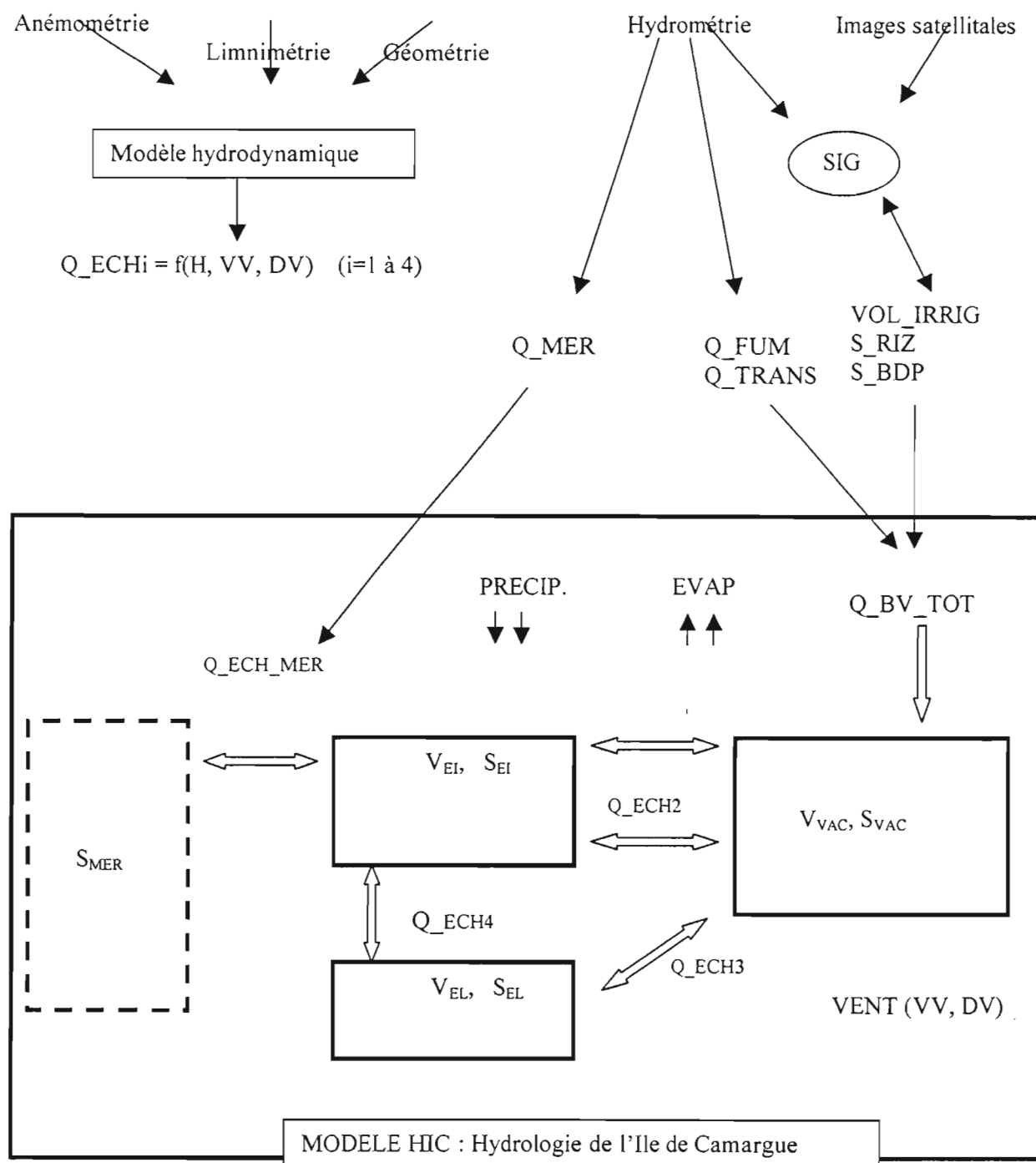


Fig. 3 : Résumé de la démarche de modélisation et structure du modèle conceptuel intégré HIC

Légende :

H : cote du plan d'eau, VV : vitesse du vent, DV ; direction du vent (8 secteurs);  
 Q\_ECHi : fonction d'échange hydraulique dans les passes ;  
 Q\_MER, Q\_ECH\_MER : débit d'échange avec la mer calculé à partir des données limnimétriques, et optimisé par le modèle ;  
 Q\_FUM, Q\_TRANS : débit du Fumemorte, débit de transfert entre bassins poldérisés et bassin de Roquemaure ; VOL\_IRRIG : volume d'eau introduit sur les bassins d'irrigation, S\_RIZ : superficie en riz ; S\_BDP : superficie du bassin de drainage permanent  
 Q\_BV\_TOT : débit total du bassin versant ;  
 V<sub>xx</sub> et S<sub>xx</sub> : Volume et stock de sel dans chaque réservoir (VAC : Vaccarès ; EI sous unité Impérial, EL sous unité Lion).

## LE MODELE « HYDROLOGIE DE L'ILE DE CAMARGUE » (HIC)

Ce modèle (Fig. 3) s'intéresse au système des étangs comme intégrateur de toutes les contraintes hydrauliques et hydrologiques liées au bassin versant, à la mer et au vent, qui vont en modifier le niveau et la salinité. Le développement de ce modèle conceptuel a été réalisé en utilisant le logiciel de programmation Vensim™. Les variables d'entrée du modèle sont :

- la pluie et l'évaporation sur le plan d'eau des étangs,
- les apports du bassin versant,
- les échanges entre les étangs liés au vent,
- les échanges avec la mer.

La pluie et l'évaporation sont calculée au pas de temps journalier à partir des données météorologiques recueillies à la Tour du Valat.

Les apports du bassin versant sont estimés à partir de l'étude hydrologique utilisant les données géoréférencées du SIG. Les débits des bassins autres que celui de Fumemorte sont simulés en fonction de leurs caractéristiques relativement à celles du bassin de Fumemorte, seul bassin jaugé.

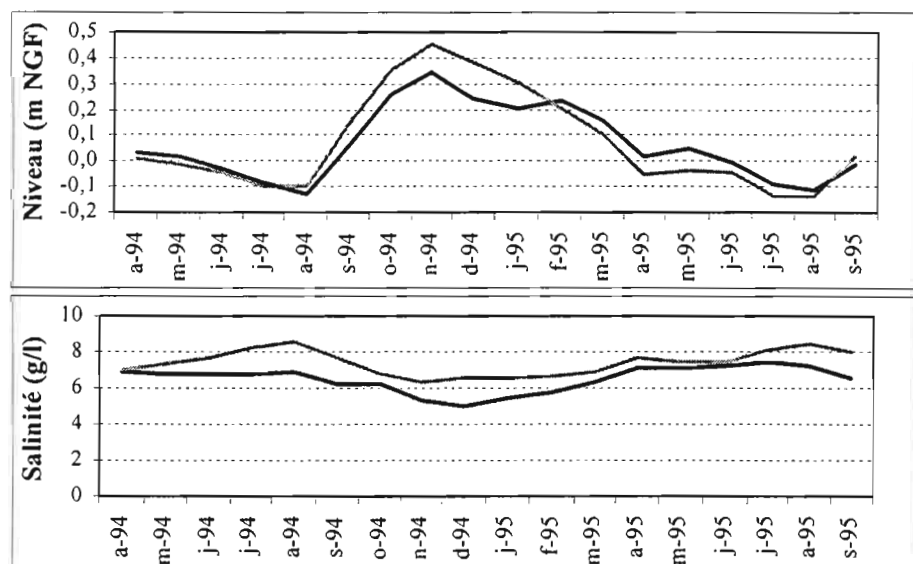
Les caractéristiques prises en compte sont :

- Le rapport des superficies des bassins de drainage permanents, c'est à dire à l'exclusion des zones endoréiques,
- Le rapport des superficies cultivées en riz,
- Le rapport des volumes d'irrigation estimés pour la saison.

Les échanges entre les réservoirs sont calculés à partir des résultats de l'étude hydrodynamique. Pour chaque direction de vent, le calcul de l'échange entre deux réservoirs-étangs se fait en appliquant une relation donnant la vitesse moyenne d'échange en fonction de la vitesse du vent et du niveau moyen des étangs,

Les échanges entre l'étang de l'Impérial et la mer par le grau de la Fourcade sont calculés à partir des relevés d'ouverture des vannes et de la décote entre l'étang et la mer, le coefficient de débit étant supposé différent, selon que le flux est entrant ou sortant.

Pour fonctionner correctement le modèle HIC utilise plusieurs variables d'entrée dont la précision fera la qualité du calage et des résultats fournis par le modèle. Les périodes pour lesquelles on dispose de données de bonne qualité pour l'ensemble des variables d'entrée sont assez limitées. C'est pourquoi la période de calage du modèle a été réduite à moins de deux ans, ce qui reste insuffisant pour assurer une calibration de bonne qualité des paramètres du modèle (Fig.4).



**Fig. 4 : Valeurs observées (noir) et simulées par le modèle (gris) pour niveau et salinité du Vaccarès, résumées au pas de temps mensuel, de avril 94 à septembre 95.**

## CONCLUSION

La méthodologie utilisée, est basée sur l'exploitation de données issues d'un SIG pour l'estimation des apports du bassin versant aux étangs, et elle couple successivement une approche déterministe (hydrodynamisme) et conceptuelle (modèle intégré HIC).

Après les réserves formulées sur la disponibilité et la qualité des données utilisées, on conçoit que la formulation et le paramétrage actuel du modèle conceptuel HIC ne constituent qu'une étape de développement méthodologique.

Le modèle ne pourra être opérationnel que si son calage est amélioré grâce à l'acquisition de nouvelles données de terrain fiables (niveaux moyens des étangs, débit d'échange avec la mer) et pertinentes par rapport à l'objectif de modélisation. Cette amélioration du calage concernant le modèle hydrodynamique et par suite, le modèle conceptuel intégré. Un jeu de données complémentaire permettra aussi de valider les modèles ; une étude de sensibilité au paramétrage des modèles devra être effectuée.

La quantification des apports du bassin versant reste un problème délicat en période culturale. Il est envisagé de développer et calibrer un modèle conceptuel semi-distribué sur le bassin de Fumemorte, avec des paramètres dérivés de caractéristiques spatiales (occupation du sol, densité de drainage, volumes spécifiques d'irrigation...), les apports totaux du bassin versant étant extrapolés selon la démarche déjà décrite.

Il est prévu aussi d'ajouter un sous modèle d'intrusion hydro saline à travers le corps de digue et le fond sablo limoneux des étangs inférieurs.

La démarche globale de modélisation, permettra à terme de développer des scénarii prenant en compte des niveaux différents des contraintes anthropiques, qui vont influencer les apports du bassin versant (modification des surfaces en riz, des systèmes de drainage, ...) et/ou les échanges avec la mer (suppression des vannes, aménagement des graus, ...).

## REFERENCES

- CHAUVELON P. 1996. Hydrologie quantitative d'une zone humide méditerranéenne aménagée: le bassin de Fumemorte en Grande Camargue, delta du Rhône. Thèse de Doctorat, Univ. Montpellier 2 USTL, 275p
- CHAUVELON, P., 1998. A wetland managed for agriculture as an interface between the Rhône river and the Vaccarès lagoon (Camargue, France): transfers of water and nutrients. *Hydrobiologia* 373/374: 181 - 191.
- CHAUVELON P. , SANDOZ A., HEURTEAUX V., BERCEAUX A., in press. Satellite remote sensing and GIS used to quantify water input for rice cultivation (Rhône delta, France). *Hydrological Sciences Journal*, IAHS special publ.
- GINDRE D., HEURTEAUX , P., R. VIANET, 1999. Les infrastructures d'irrigation et de drainage sur le territoire du Parc naturel régional de Camargue. *Courrier du Parc* n°48/49, p 44-83.
- HEURTEAUX, P., 1992. Modifications du régime hydrique et salin des étangs du système Vaccarès (Camargue, France) liées aux perturbations anthropiques des cinquantes dernières années. *Annls Limnol.* 28: 157-174.
- HEURTEAUX, P., 1994. Essai de quantification des termes du bilan hydrique des étangs du système Vaccarès (Camargue, France). *Annls Limnol.* 30: 131-144.

# MODELISATION HYDROLOGIQUE SPATIALISEE DE PETITS BASSINS VERSANTS EN CONTEXTE SEMI-ARIDE MEDITERRANEEN

Mansouri T.\*. Albergel J.\*. Séguis L.\*\*.

\* IRD Tunis Bp 434 El Menzeh

\*\* IRD Montpellier

## RESUME

Ce papier présente l'application d'un modèle physique de modélisation hydrologique : Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS2) au bassin versant du lac collinaire El Gouazine en Tunisie centrale semi-aride. Ce modèle a été utilisé pour reproduire les débits mesurés pour plusieurs événements "averse - crue".

Nous décrivons : la préparation des données, l'estimation des paramètres, l'analyse de sensibilité des principaux paramètres, la calibration du modèle et sa validation en vue d'une exploitation ultérieure.

Le modèle présente une trentaine de paramètres. Nous avons effectué une analyse de sensibilité sur sept paramètres de la fonction de production nécessitant un calage. Les paramètres de la fonction de transfert dérivent du modèle numérique de terrain effectué sur le bassin.

Un échantillon de 34 crues entrant dans la retenue collinaire et reconstituées à partir des données hydro-pluviométriques a été utilisé pour la mise en œuvre du modèle. Ces crues ont été observées entre 1994 et 1998, période pendant laquelle un important aménagement des versants a été réalisé. En 1996-97, 470 hectares ont été aménagés en digues isohypes d'environ 2 m de haut.

Le critère de Nash a été utilisé pour évaluer l'adéquation du modèle aux observations. Les valeurs du coefficient de Nash pour les lames écoulées, débit maximum et temps de réponse de crues varient de 0.84 à 0.92 en calage. En validation ces valeurs se sont légèrement dégradées et varient de 0.7 à 0.9.

## MOTS CLES

Tunisie, semi-aride, modèle "pluie - débit", petit bassin versant, aménagement, KINEROS2, retenue collinaire.

## INTRODUCTION

Le développement de l'informatique a provoqué au cours des vingt dernières années une abondance de modèles mathématiques dans les sciences de l'eau, dont l'objectif est de prévoir la future distribution des ressources en eau et de mieux comprendre les mécanismes physiques et chimiques mis en jeu (Abott et Refsgaard, 1996).

Les modèles hydrologiques à paramètres physiques distribués, décrivant de mieux en mieux les différents processus en jeu, permettent maintenant de lier les flux d'eau aux caractéristiques physiques des bassins versants et résolvent une forme aussi complète que possible des équations de continuité et de quantité de mouvement lié au transport d'eau et/ou de substances ou d'énergie (Musy, 1998).

Ils permettent de prendre en compte des modifications dans le bassin versant tel que les aménagements anti-érosifs ou les modifications d'occupation des sols suivant les saisons ou les transformations des itinéraires agricoles (Moussa et al, 1998).

Pour décrire le ruissellement par événement pluvieux sur un bassin versant représentatif du milieu semi-aride, on propose d'utiliser un modèle à bases physiques KINEROS2 (Woolhiser et al, 1989). Ce modèle, mis au point sur des bassins versants grecs en milieu méditerranéen, utilise le modèle d'infiltration de Green & Ampt (1911) pour calculer le ruissellement et la propagation de l'onde cinématique pour calculer le transfert de l'eau. Il tient compte de l'hétérogénéité spatiale des caractéristiques du bassin versant et de la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations et des processus de redistribution de surface. Il tente de reproduire les mécanismes physiques du cycle de l'eau.

Ce modèle a été utilisé en zone sub-humide tunisienne, sur le bassin versant de l'oued Mkhachbia d'une superficie de 106 km<sup>2</sup> (Jaoued, 1996). Il a été calé sur quatre crues et n'a pas donné lieu à de validation. En zone semi-aride tunisienne, (Lajili, 1998) a aussi réalisé un calage du modèle sur le petit bassin versant de Bargou (1.4 km<sup>2</sup>).

Etant distribué et développé spécifiquement pour des régions semi-arides, nous avons utilisé ce modèle sur le bassin versant d'El Gouazine (16.9 Km<sup>2</sup>) sur lequel nous avons réalisé une importante base de données géographique et une autre hydro-pluviométrique.

## **DONNEES ET METHODES**

### **Données géographiques**

Le bassin versant du lac El Gouazine a une superficie de 16.9 km<sup>2</sup>. Il appartient au bassin versant du Nebhana en Tunisie centrale semi-aride. Il appartient au synclinal d'Oueslatia et est constitué par des marnes intercalées de barres calcaires du Lutétien Bartonien. Ces barres calcaires ont un fort pendage. La partie amont du bassin versant est surmontée par des encroûtements calcaires sub-horizontaux. Les interfluves présentent des sols calcimagnésiques à encroûtement calcaire plus ou moins enduré ; tandis que les vallées présentent des sols peu évolués. Le pourcentage de cailloux en surface dans l'amont du bassin versant témoigne de l'érosion en nappe.

L'occupation des sols varie d'un couvert semi-forestier à des parcelles totalement consacrées à l'activité agricole : terres cultivées (45 %), des forêts denses et claires (17 %), des parcelles d'alfa (11 %), des terres de parcours et de garrigues (18 %), des vergers (1.7 %), oliviers et céréales (4.7 %). Un petit barrage a été construit à l'exutoire de ce bassin en 1990 ; le lit de l'oued et le lac collinaire occupent 1.6 % de la surface. 40% de sa superficie a été aménagée en banquettes isohypses en 1996 et 1997. Cet aménagement concerne les terres de céréalicultures et les vergers.

Le climat est de type méditerranéen semi aride avec une saison chaude d'été et une saison fraîche d'hiver. La continentalité et le relief accentuent les contrastes thermiques et la sécheresse de l'été. La pluviométrie est en moyenne de 350 mm mais connaît une très forte variabilité tant spatiale que temporelle. Durant la période d'observation (1994 à 2000) la pluviométrie annuelle a varié de 253 mm à 577 mm.

Les coordonnées du lac en Latitude et Longitude sont respectivement de 35°54'30 N, 9°42'13 E. L'altitude varie de 376 à 575 m. L'indice de pente est de 18 m/km. La densité du réseau hydrographique 4.5 km/km<sup>2</sup>.

### **Caractéristiques et données hydrologiques**

Ce travail a été effectué dans le cadre du programme HYDROMED (Albergel & Rejeb, 1997). Les données hydropluviométriques proviennent de la banque de données DCES /IRD (1996 à 2000).

Un suivi hydrologique a été mis en place en octobre 1993. Il consiste en (i) l'enregistrement des variations de hauteur d'eau à la retenue collinaire, (ii) des mesures de bathymétrie, (iii) l'étalonnage du déversoir et des fuites du barrage, (iv) un suivi de la pluviographie en 2 points : amont et aval du bassin versant.

Nous avons effectué un dépouillement des données hydro-pluviométriques et reconstitué les crues du lac collinaire avec un pas de temps de 5 minutes (Albergel, Mansouri, Pépin et Séguis, 1999). Il en ressort un apport moyen annuel de 206035 m<sup>3</sup>, une lame ruisselée moyenne annuelle de 11 mm, un coefficient de ruissellement moyen annuel de 3 %, le coefficient de ruissellement à l'échelle de l'averse peut atteindre 39 %.

La pluie journalière maximale observée est de 80 mm, elle a eu lieu le 24/9/98. En considérant la station de référence d'Oueslatia, sa période de retour est de 6 ans. Le débit maximum observé de la plus forte crue est de 35 m<sup>3</sup>/s, le débit spécifique correspondant est de 2100 l/s/Km<sup>2</sup>, il correspond à des intensités en 5 et 30 minutes respectives de 53 et 27 mm/h.

Le lac a vécu trois périodes d'assèchement avec des niveaux de fond de la retenue croissants. Ceci atteste d'un envasement progressif du lac. La cote de déversement du lac est de 830 cm. Nous avons observé deux déversements les 20 et 21 puis 24 et 25 septembre 1995 (Fig. 1).

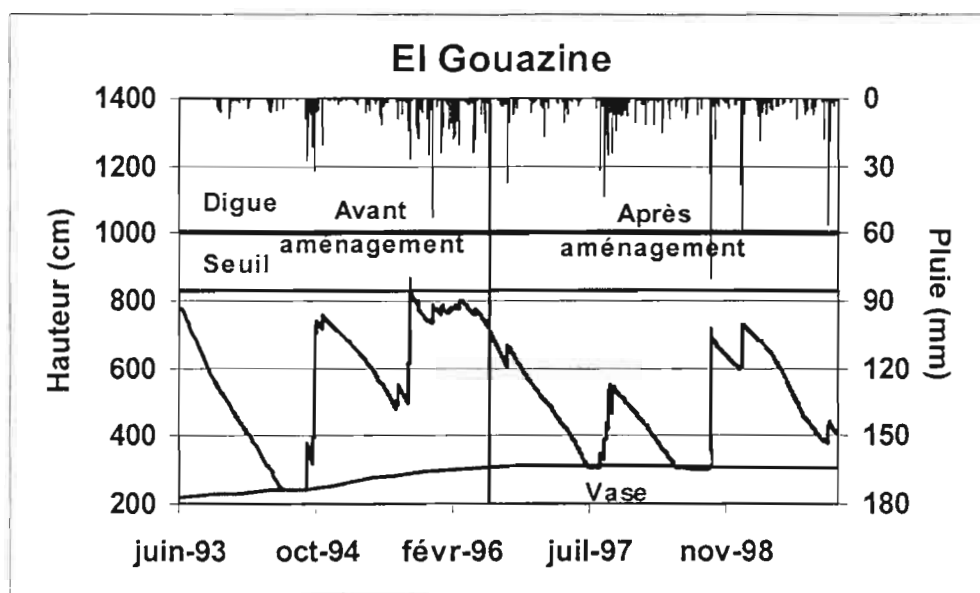


Fig. 1 : Variation des niveaux de remplissage du lac collinaire El Gouazine

On remarque un affaiblissement important de l'hydraulicité du bassin après les aménagements de 1996 et 1997, le lac n'a plus déversé même pour la pluie du 24/09/98.

Choix des événements "averse - crue" pour la modélisation

Nous avons utilisé les données pluviographiques des deux stations en fonctionnement depuis le début des observations hydrométriques (El Gouazine Lac se trouve en aval du bassin et Dékikéra au premier tiers amont). Nous avons reporté sur le même graphique les hyétogrammes des pluies qui ont généré des crues pour les 2 stations ainsi que les hydrogrammes correspondant.

Nous avons choisi les événements survenus avant aménagement du bassin versant soit 14 événements sur 24 événements. Nous avons dû supprimer 10 crues qui ne peuvent pas être expliquées par les données pluviographiques existantes. Trois parmi ces crues sont survenues avant les pluies, et s'expliquent par des pluies tombées hors de la zone d'installation des pluviographes. Les crues survenues après aménagement ont servi à la détermination de l'impact de l'aménagement qu'on développera dans une publication ultérieure.

Le tableau 1 donne la liste des crues retenues et leurs caractéristiques. Les 8 premières lignes correspondent aux crues utilisées lors du calage.

TABLEAU.1: caractéristiques des crues retenues

Date	pluie lac (mm)	pluie Dékikira (mm)	Volume écoulé (m <sup>3</sup> )	Coefficient d'écoulement (%)	Débit maximal (mm/h)	Débit spécifique (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )
04/11/94	14	19	27000	12	2.1	0.4
09/06/95	9.5	12	1720	1	0.6	0.1
13/09/95	12	17	36300	18	2.3	0.5
20/09/95	27	17	147340	32	7.8	1.7
22/09/95	9.5	14	26089	16	1.6	0.3
11/12/95	6.5	3.5	6000	5	0.7	0.1
15/02/96	11	8.5	8000	4	1.4	0.3
15/03/96	6	7	6000	6	1.4	0.3
30/09/94	12	15	12140	5	5.7	1.2
03/10/94	19	21	125189	39	6.25	1.3
17/09/95	14	11	11495	6	0.02	0.0
10/12/95	25	31	27166	7	3.3	0.7
13/01/96	25	2.8	14000	3	0.75	0.2
14/03/96	13	13	6000	3	0.7	0.1



## Données cartographiques

Les données cartographiques disponibles sont :

- Les courbes de niveau numérisées au 1/25 000<sup>ème</sup> et au 1/50 000<sup>ème</sup> à partir des cartes topographiques OTC ;
- Les points cotés digitalisés à partir des cartes topographiques OTC au 1/50 000<sup>ème</sup> ;
- Le réseau hydrographique et les limites des bassins versants numérisés au 1/50 000<sup>ème</sup> ;
- Les cartes pédologiques et d'occupation des sols des bassins versants numérisés au 1/20 000<sup>ème</sup> ;
- Les photo-aériennes au 1/20 000<sup>ème</sup> dont la correction géométrique a été faite à l'aide de levées GPS sur le terrain.

## LE MODELE HYDROLOGIQUE KINEROS2

### Principe du modèle

Le modèle KINEROS2, conçu en 1977 par Woolhiser, Smith et Goordich, est un modèle mathématique distribué événementiel à bases physiques qui décrit les processus d'interception, d'infiltration, de ruissellement et d'érosion des bassins versants urbains ou agricoles. Le bassin versant est représenté par une cascade de plaines et de chenaux. Les équations qui décrivent le ruissellement sur les panneaux et son transfert dans les chenaux, l'érosion et le transport solide sont résolus par la technique des différences finies. Il tient compte de la variabilité spatiale de la pluie de l'infiltration et des paramètres d'érosion. Il permet de voir l'impact des aménagements sur le ruissellement et le transport solide. Dans ce travail nous nous intéressons qu'à la modélisation pluie débit, sans aborder la modélisation du transport solide.

### Fonction de production

La fonction de production néglige l'évapotranspiration et l'écoulement souterrain qui sont des quantités mises en jeu très faibles durant les crues de courtes durées sur les petits bassins versants méditerranéens.

L'interception (I) est la partie des précipitations qui est retenue par le feuillage du couvert végétal et les flaques de petites dépressions endoréiques. Par conséquent, elle est exclue du taux du ruissellement. Elle est influencée par la végétation, les saisons et la vitesse du vent.

Au début d'un orage, sur un bassin versant, il y a toujours une période initiale pour laquelle le taux d'infiltration (f) est égal aux taux de pluie (r) et l'excès de pluie (q) est nul. Durant cette période, le sol a tendance à absorber une quantité d'eau plus importante que celle fournie par la pluie : c'est la période limite d'infiltration. Le taux maximal de l'eau qui entre dans le sol, est appelé capacité d'infiltration (fc).

Il est décrit par la fonction (f) qui dépend de la teneur initiale en eau ( $\theta_i$ ) et de la quantité de pluie déjà absorbée par le sol (F) :

$$F_c = f(F, \theta_i)$$

La teneur initiale en eau est maintenue constante sur une profondeur mouillée, mais elle varie entre les événements orageux. La relation  $f(F, \theta_i)$ , est dérivée d'une supposition simplifiée admettant une solution analytique de l'équation d'écoulement de Darcy et la continuité de la surface traversée par l'eau (Smith et al, 1993).

$$G = 1/K_s \int_0^\infty K(\Psi) d\Psi$$

Où G : la capillarité effective nette ;

Ks : la conductivité hydraulique relative du sol ;

$\Psi$  : la matrice potentielle du sol ;

K( $\Psi$ ) : fonction de la conductivité hydraulique.

La capillarité effective nette (G), dépend des caractéristiques hydrauliques du sol. C'est un paramètre qui peut être déterminé sur terrain à l'aide d'un infiltromètre. Il peut être aussi approché lorsque l'on connaît le Ks.

## **Fonction de transfert**

Elle est basée sur l'équation de l'onde cinématique.

## **RESULTATS**

### **DECOUPAGE DU BASSIN VERSANT EN PANNEAUX HOMOGENES**

Suivant le principe de la modélisation exposé, nous avons commencé par découper le bassin versant en panneaux homogènes et défini les biefs qui forment une image des chemins de l'eau. Le premier découpage est celui des unités hydrauliques. Il est obtenu à partir de la réalisation d'un modèle numérique de terrain (MNT). Un second découpage est réalisé à partir de la définition de zones aux quelles on peut associer les mêmes paramètres de production. Elles sont définies à partir du SIG qui croise les cartes d'occupation des sols et leur nature. Les zones aménagées ont été individualisées en fonction de la date des travaux.

Les biefs ont été déterminés à partir du réseau hydrographique obtenu sur les photos aériennes redressées. Nous avons aussi calculé un réseau hydrographique par le MNT, mais il a paru moins précis que celui des photos aériennes.

#### **Réalisation d'un modèle numérique de terrain et définition des sous bassins**

Nous avons choisi d'utiliser la méthode de la triangulation pour obtenir un MNT avec une grande précision. Ce modèle a été ensuite validé : on a comparé les courbes de niveaux calculées à celles de la carte topographique, les contours de bassins et les plus grands cours d'eau générés par le MNT à ceux observés sur le terrain. Cette phase de validation a servi à rectifier ce modèle en rajoutant quelques points de limite du bassin.

La figure 3a montre le MNT réalisé au pas de 20 m sur le bassin d'El Gouazine.

#### **Réalisation du SIG**

Trois cartes ont été réalisées sur le terrain puis digitalisées et géoréférenciées dans le logiciel ARC VIEW :

- La carte d'occupation des sols ;
- La carte de la nature des sols ;
- La carte des aménagements de conservation des eaux et des sols (CES).

A ces trois cartes on rajoute celles obtenues par le MNT : carte des altitudes, carte des pentes, carte d'orientations des pentes, carte des contours de sous-bassins et celle du réseau hydrographique.

#### **Définition des panneaux élémentaires de la modélisation**

Le modèle numérique de terrain (MNT), l'occupation des sols, la pédologie et l'état de surface servent au découpage du bassin versant en zones homogènes (panneaux) requis par le modèle. La réflexion sur les paramètres pertinents pour réaliser ce découpage a conduit à un découpage en se basant sur les plans dérivés du MNT à savoir les contours, les pentes et leurs orientations ainsi que les directions d'écoulements (Fig. 3). Nous sommes basés aussi sur le réseau hydrographique qui a servi pour le découpage en biefs.

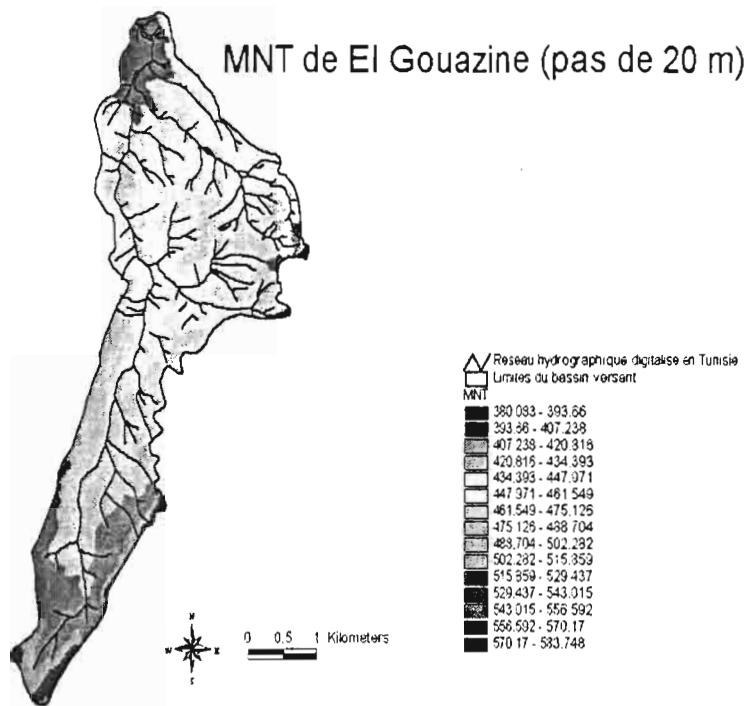


Fig.3a : modèle numérique de terrain du bassin versant

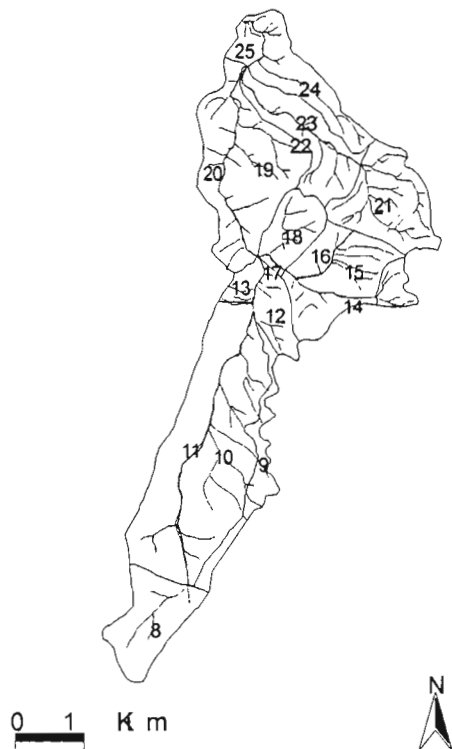


Fig.3 découpage du bassin versant en panneaux

### Définition des paramètres de production

Pour chaque paramètre nous avons établi une carte qui a été croisée avec la carte du découpage en panneaux. Les valeurs des paramètres obtenus ont été pondérées par les surfaces. D'où pour chaque panneau une valeur du paramètre pondérée par la surface a été obtenue.

## Détermination de valeurs acceptables pour le bassin étudié

### L'interception (I)

Les hauteurs de pluies interceptées pour différents types d'occupation de sols déterminés expérimentalement aux Etats-Unis (Lawrance et Dingman, 1996).

### La conductivité hydraulique à saturation (Ks)

Nous avons effectué une campagne de simulation de pluie à l'aide d'un irrigateur manuel à rampe (Roose, 1996) dans le bassin versant d'El Gouazine. Le dépouillement de ces données a permis de déterminer les valeurs de la conductivité hydraulique à saturation (Ks) pour chaque site de simulation.

Les valeurs de Ks pour El Gouazine ont été assimilées aux valeurs de Fn déterminées à l'arrosoir et calées par rapport à la simulation de pluie effectuée dans le bassin versant de Mrichet (Palmquist et Tullberg, 1997) proche de la zone d'étude (Tab. 4).

### La succion au niveau du front d'humectation (G)

Les valeurs de Ks déduites de la simulation de pluie ont servi à déduire les valeurs de G (Tab. 4) à partir de la formule de Green et Ampt (1911).

### Humidité antécédente aux averses

Dans la genèse des écoulements dans les régions semi-arides, l'humidité antécédente aux averses joue un rôle important. Le Ik choisi est celui de Kholer (Linsey et al, 1949).

$I_k n$  est l'indice des précipitations antérieures de Kholer, correspondant à un indice d'humectation avec  $I_k n, j = (I_k n, j-1 + P n, j-1) e^{-aT}$

T : est l'intervalle de temps en jours séparant les pluies journalières des jours j ( $P n, j$ ) et j-1.

a : est une constante régionale égale à 0.5 dans notre cas.

Cet indice nous donne une idée sur la saturation initiale du sol (Sat).

### La porosité

Les analyses granulométriques de la porosité pour chaque type de sol ont servi de déduire les valeurs de la porosité par panneau (Tab. 4).

## Analyse de sensibilité

Nous cherchons à déterminer les paramètres les plus sensibles du modèle, l'interdépendance entre ces paramètres afin de proposer un jeu de données pour un calage optimal.

Nous avons remarqué que le modèle est sensible à la répartition spatiale des pluies. Nous avons interverti l'ordre des deux pluviographes et avons vu des différences allant jusqu'à 100 % de la valeur de la lame écoulée.

Le doublement de l'interception diminue considérablement la lame écoulée ou l'annule. Le tableau 2 résume cette analyse de sensibilité. + la lame écoulée varie peu pour un doublement de la valeur du paramètre ; ++ la lame écoulée varie moyennement et +++ la lame écoulée varie fortement sur notre bassin versant.

TABLEAU 2 : Analyse de sensibilité

G	Ks	Ma	I	CV	THI (panneau)	THI (bief)
++	+++	+++	++	+	+++	+++

## DEFINITION DES PARAMETRES DE LA FONCTION DE TRANSFERT

Les paramètres de la fonction de transfert dans les panneaux sont directement calculés dans le MNT (Tab. 4, colonne 2 à 5).

TABLEAU 3 : Paramètres des panneaux du bassin versant d'El Gouazine

Identifiant	Longueur moyenne (m)	Largeur moyenne (m)	Pente moyenne (%)	Surface (Km <sup>2</sup> )	Porosité	G	Ma	Ks
8	1450	833,22	6,91	1,21	43	90	0,18	54
9	210	3221,97	11,12	0,68	45	79	0,21	60
10	650	3922,71	5,90	2,55	36	96	0,20	51
11	430	5161,81	7,14	2,22	42	126	0,19	37
12	1100	488,13	6,64	0,54	42	255	0,2	19
13	410	585,89	10,38	0,24	45	86	0,18	57
14	1600	503,97	5,23	0,80	48	86	0,21	57
15	750	1048,11	6,31	0,79	43	170	0,22	40
16	325	1005,75	8,47	0,33	45	79	0,21	61
17	110	387,42	8,09	0,04	38	135	0,24	32
18	1000	652,57	10,83	0,65	45	94	0,21	53
19	850	1879,37	7,76	1,60	45	83	0,19	59
20	320	3674,65	8,45	1,18	34	114	0,19	45
21	1200	1330,44	9,67	1,60	45	76	0,20	62
22	425	1695,80	8,73	0,72	41	142	0,19	47
23	210	2295,35	8,03	0,48	46	73	0,18	64
24	1950	538,07	8,96	1,05	41	114	0,21	43
25	370	632,51	4,72	0,23	44	73	0,18	63

Dans les biefs, les paramètres longueur et pentes sont donnés par le MNT, la largeur est une largeur moyenne mesurée sur le terrain, l'infiltrabilité dans le bief et la rugosité sont données par des abaques en fonction de la nature lithologique et l'encombrement des lits de l'oued (LAWRANCE, 1994) (tab. 4).

TABLEAU 4 : paramètres morphologiques des biefs du bassin versant d'El Gouazine

Identifiant	Longueur (m)	Identifiant des panneaux et des biefs amont	Identifiant des panneaux latéraux	Pente moyenne (%)	Profondeur (m)	Largeur (m)	Rugosité
107	1051,6	105,106	24,25	4,05	1,50	2,50	0,04
106	2477,2	21	22,23	5,91	1,00	3,00	0,04
105	3226,8	102,104	19,20	4,20	2,00	3,00	0,04
104	504	14,103	17,18	5,53	1,00	2,00	0,04
103	1360	14	15,16	5,33	1,00	2,00	0,04
102	762	101	12,13	5,52	1,00	2,00	0,04
101	4482,6	8	10,11	4,68	1,00	2,00	0,04

## CALAGE DU MODELE

Huit crues ont été sélectionnées pour caler le modèle. L'échantillon initial de 14 crues a été divisé en deux lots : 2 crues fortes et 12 crues moyennes ou faibles. Une procédure de tirage au hasard a été réalisée pour choisir 1 crue parmi les fortes et sept crues parmi les moyennes ou faibles sans considérer ni la date ni la saison. Nous avons joué sur les valeurs des paramètres les plus sensibles pour optimiser ce calage en prenant comme critère d'optimisation la valeur la plus proche de 1 pour le critère de Nash qui permet de minimiser les écarts entre les valeurs observées et simulées (Nash et Sutcliffe, 1970).

Le modèle permet de faire varier les valeurs d'un paramètre dans tous les panneaux ou tous les biefs dans une même proportion.

Le scénario retenu donne des coefficients de Nash suivant pour les trois principaux paramètres de crue : la lame écoulée (0.98), temps de réponse (0.94) ; et débit de pointe (0.98) (Fig. 4, 5 et 6). Il a été obtenu en divisant G par 10 et Ks par 15 dans tous les panneaux et en fixant les valeurs suivantes : Ks dans les biefs à 100 mm/h, CV (coefficient de variation du Ks à l'intérieur d'un même panneau) à 0.1, l'indice de saturation des sols avant la pluie à 0.4 quel que soit l'événement antécédent.

En dépit d'un coefficient de Nash de 0.94 le temps de réponse reste un phénomène très difficile à contrôler en effet les simulations ou le temps de réponse ne coïncide pas avec celui mesuré correspondent à :

- Des crues à plusieurs pics : 13/9/95 et 22/09/95 ;
- Des données où il y a une réaction brutale du bassin versant (5 min.) : crue du 9/6/95 qui ne semble pas être très bien expliquée par les données pluviométriques surtout que le bassin versant est très allongé ;
- Des intensités de pluie et des débits maximums de crues observés très faibles : crue 15/03/96.

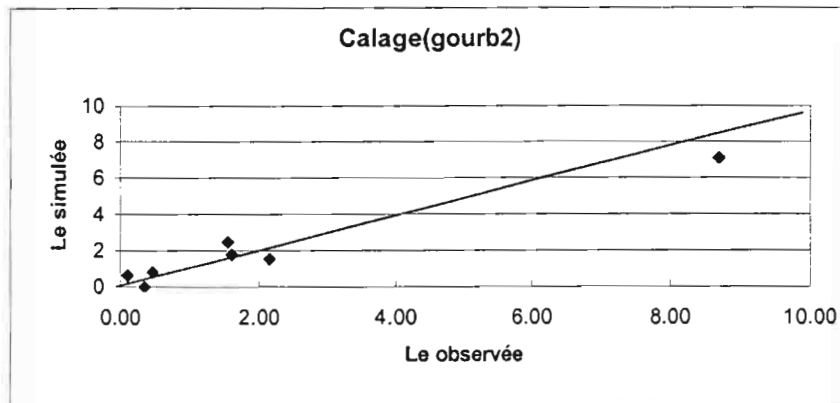


Fig.4: Variation de la lame écoulée calculée en fonction de celle observée (mm)

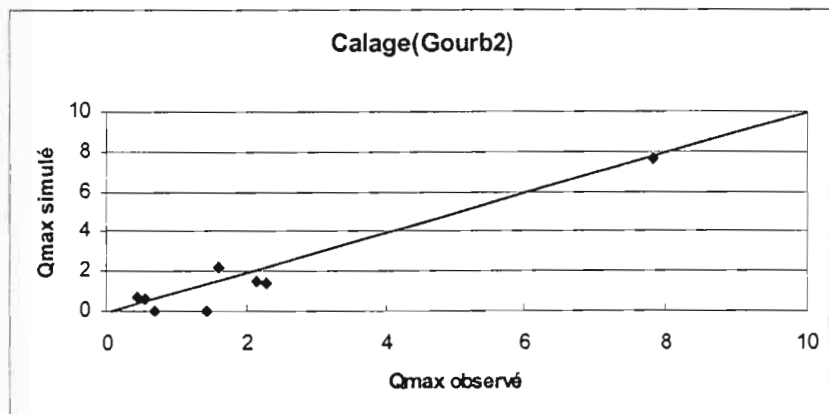


Fig.5: Variation du débit de pointe calculé en fonction de celui observé (m³/s)

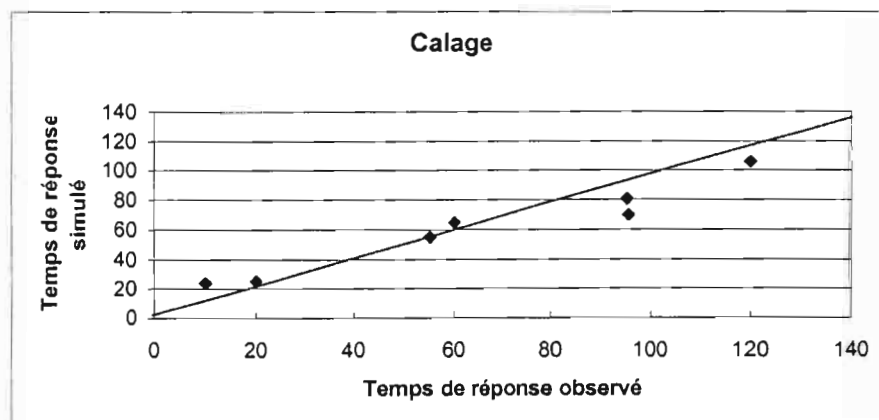


Fig.6: Variation du temps de réponse simulé en fonction de celui observé (min.)

## VALIDATION DU MODELE

Les 6 crues non considérées lors du calage ont été utilisées pour la validation. Le jeu de paramètres établi dans la phase de calage est utilisé pour faire tourner le modèle sur ces six crues. Les coefficients de Nash se sont légèrement détériorés mais restent acceptables : ils sont respectivement pour la lame écoulée de 0.7, pour le débit de pointe de 0.91 et pour le temps de réponse de 0.82. Les graphiques 7, 8 et 9 montrent pour les simulations de lame écoulée, le temps de réponse et le débit maximum de crues, les différences entre valeurs observées et valeurs calculées.

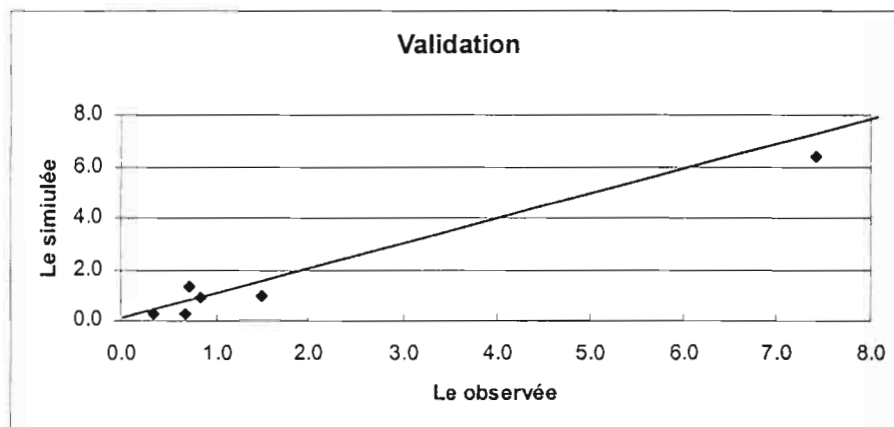


Fig.7: Variation de la lame écoulée calculée en fonction de celle observée (mm)

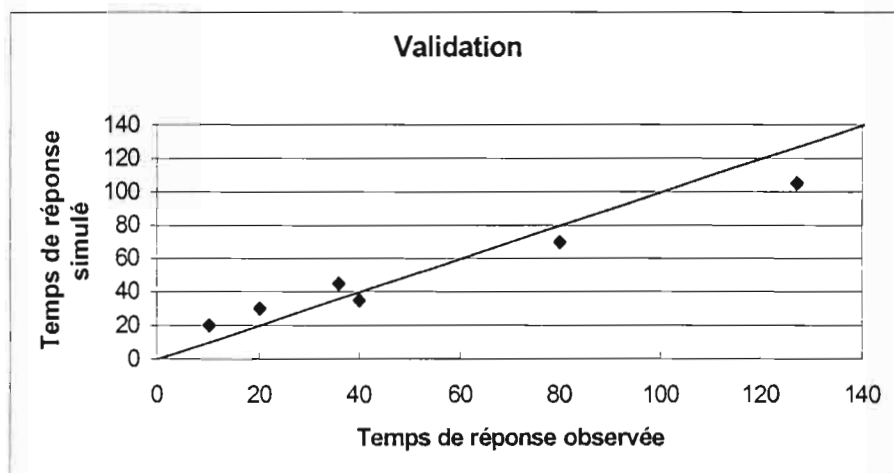


Fig.8: Variation du temps de réponse simulé en fonction de celui observé (min.)

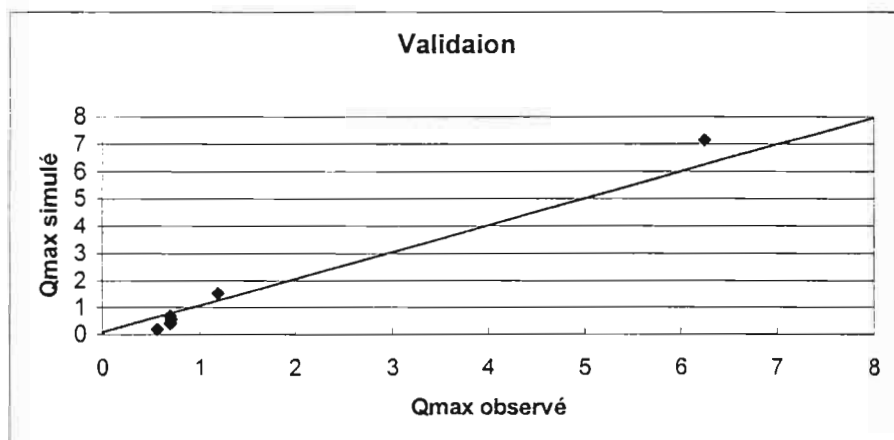


Fig.9: Variation du débit de pointe calculé en fonction de celui observé (m³/s)

## DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans la phase de calage l'essai de tenir compte d'une saturation initiale à partir de l'indice de Kohler pour chaque averse n'a pas donné de bons résultats. Une valeur unique faible a été préférée. Des améliorations du calage peuvent se faire en modifiant par essais successifs cette valeur pour chaque crue en fonction des pluies antécédentes mais nous n'avons pas trouvé de relation significative entre l'indice de Kohler et la valeur à attribuer.

Utiliser un paramètre interception par la végétation n'a pas amélioré le calage. Les abaques proposés pour définir ce paramètre ne conviennent pas en Tunisie semi-aride. A titre d'exemple le bassin versant présente des forêts denses, moyennement denses et claires. Les abaques donnent une seule valeur de 15 mm l'interception pour les forêts. Cette valeur annule de nombreux écoulements dans le bassin. Les cultures annuelles non pérennes n'interceptent pas les pluies de la même façon tout le long de l'année. Les abaques n'en tiennent pas compte.

Les différences entre les débits maximums de crues observées et simulées s'expliquent par la réponse variable du bassin dépendant de la répartition spatiale des pluies. Les réponses brutales sont générées par des pluies fortes près du lac, les réponses lentes sont générées par des pluies qui ont lieu sur la partie la plus en amont du bassin versant.

Il est à signaler que, malgré le coefficient de Nash plausible, les hydrogrammes observés et simulés présentent quelques décalages. Nous expliquons ceci par :

- Le manque des données sur l'hétérogénéité spatiale des pluies pour lequel le modèle est sensible ; deux autres pluviographes ont été installés en 1998 sur le bassin. Leurs observations devraient améliorer les résultats ;
- Les paramètres réels ne peuvent tous être pris en compte. Il reste certains processus inconnus qui ne permettent pas une simulation coïncidant avec la réalité. La simulation de pluie donne un ordre de grandeur des valeurs de la conductivité hydraulique à saturation ce qui s'est traduit par une division des valeurs par 15 lors du calage, des simplifications ont été faites lors de la détermination de l'humidité au niveau du front d'humectation. Le coefficient de Manning a été déduit d'un abaque (Lawrance et Dingman, 1994).

Cette première tentative d'utilisation du modèle KINEROS2 à un bassin versant du semi-aride Tunisien en utilisant un même jeu de données pour 14 crues permet de montrer que ce modèle peut s'appliquer aux bassins ruraux.

La sélection des crues et la grande sensibilité du modèle à l'inversion des pluviographes montrent que les modèles spatialisés requièrent une bonne connaissance de la variabilité spatiale de l'entrée. Hors s'il est facile de construire un SIG à partir des données invariables dans le temps comme la pédologie ou faiblement variables comme l'occupation des sols il est beaucoup plus difficile d'entretenir un réseau d'observations fiables de la pluviographie.

Avec l'apparition des modèles spatialisés et des SIG un effort important a été réalisé sur la cartographie des caractéristiques physiques des bassins versants, mais sans générer le même effort sur l'observation hydropluviométrique.

## BIBLIOGRAPHIE

- ABOTT M B et REFSGAARD., 1996. Distributed hydrologic modeling. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- ALBERGEL J, MANSOURI T, PEPIN Y et SEGUIS L., 1999. Reconstitution des crues des lacs collinaires de la Tunisie centrale et du Cap-Bon. Journal d'hydrologie de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.
- ALBERGEL J. & REJEB N., 1997. Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. Comptes rendus à l'Académie d'Agriculture de France. Vol 83 n°2 (1997) 77(2)-88(2) et 101(2)-104(2).
- GREEN W H and AMPT, G A., 1911. Studies on soil physics : 1. Flow of air and water through soils. J. Agric. Sci., 4 : 1-24.
- DCES /IRD., 1996 à 2000. Annuaire hydrologiques des lacs collinaires de la Tunisie.
- JAOUED M., 1996. Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued Mkhachbia. Mémoire de DEA. Université de Tunis II. 100 p + annexes.
- LAJILI L., 1998. L'érosion hydrique en zone semi-aride tunisienne : modélisation, estimation des paramètres et application à l'aménagement anti-érosif. Thèse de doctorat en sciences biologiques. Univ. de Gand.
- LAWRANCE and DINGMAN S., 1994. Physical hydrology. Prentice Hall, Englewood Cliffs, Jersey 07632.
- LINSEY R K, KOHLER M A and PAULUS J L., 1949. Applied hydrology, 414-418. Mac Graw Hill, New York (USA).



- MOUSSA R, LAGACHERIE P, VOLTZ M, ANDRIEUX P and BOUZIGES R., 1998. Hydrological modelling of a farmed Mediterranean catchment. Proceedings of the 16<sup>th</sup> World Congress of Soil Science, Montpellier, 20-26 august 1998, symposium 3.
- MUSY CH., 1998. Hydrologie appliquée. Office Fédéral de l'Education et de la Science/suisse (N° 96.01). Editions H\*G\*A, Bucarest.
- NASH J E, and SUTCLIFFE J E., 1970. River flow forecasting through conceptual models, part 1 – A discussion of principales. J. Hydrol., 10(3) : 282-290.
- PALMQUIST O and TULLBERG O., 1997. An experimental study of pollutant transport and erosion susceptibility in Tunisia. A study with rainfall simulation and dye in the M'Richet El Anze catchment. Master of Science thesis, Minor Field Study. Lund , (Swedish).
- ROOSE E., 1996. Méthodes de mesure des états de surface du sol, de la rugosité et des autres caractéristiques qui peuvent aider au diagnostic de terrain des risques de ruissellement et d'érosion, en particulier sur les versants cultivés de montagne. Bulletin 16, réseau érosion, états de surface du sol et risques de ruissellement et d'érosion. ORSTOM.
- SMITH R E, CORRADINI C and MELONE F., 1993. Modeling infiltration for multistorm runoff events. *Water resources research* 29(1) :133-144.
- WOOLHISER D A, SMITH D R E and GOOLDRICH D C., 1989. KINEROS : A Kinematic Runoff and Erosion Model. Documentation and user manuel. USDA, ARS. 92p + annexes.

# HYDROLOGICAL MODELLING OF FLOOD EVENTS IN A FARMED MEDITERRANEAN CATCHMENT

Moussa R.\*, Voltz M.\*, Andrieux P.\*

\* Institut National de la Recherche Agronomique, UMR Science du Sol, 2 Place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex 1, France.

## ABSTRACT

Field limits, tillage practices and ditch network constitute man-made hydrological discontinuities in farmed catchments, and are expected to influence hydrological response during flood events. The purpose of this study is to assess the role of human impact, especially the existence of tillage practices and ditch network, on flood events. The study area is the farmed basin of Roujan (0.91 km<sup>2</sup>) located in Southern France for which a spatially distributed hydrological model MHYDAS was developed and tested. The model considers the catchment as a series of interconnected field parts linked to the ditch network. Descriptions are provided for the main model procedures: computation of Hortonian excess rainfall on fields using the Green and Ampt approach, conversion of excess rainfall to surface runoff, interaction between ditch network and groundwater using a simple Darcian model and flood routing through the ditch network using the diffusive wave model. Special attention is given in this model to the specific conditions of agricultural zone in Mediterranean climate. Results show the importance of the role of ditches network and agricultural practices on the form of hydrograph, the lag time and the runoff volume during flood events.

## KEY WORDS

Distributed Hydrological Modelling; Farmed catchment; Flood routing; Ditch network; Tillage practices

## INTRODUCTION

In agricultural Mediterranean catchments, hydrological processes are imposed by the spatial and temporal variability of the rainfall regime and the agricultural practices (Voltz *et al.*, 1997). In the agricultural domain, few catchments were installed and few hydrological models were developed to study the main hydrological processes. The agricultural basin of Roujan (0.91 km<sup>2</sup>) Southern France was selected as representative of vineyard plain areas, strongly modified by human activity : ditches network, terraces, tilled and untilled fields.

Human impact such as agricultural terraces and the ditches network are expected to influence the basin response to rainfall (Gallart *et al.*, 1994). Spatially distributed models using physically realistic, process-based equations are one method of simulating the hydrologic behaviour of flow processes within catchments and predicting the human impact on hydrological processes (Abbott *et al.*, 1988; Fortin *et al.*, 1995). In using hydrologic models, the context of their original purpose and development is often lost, so they are applied to situations beyond the scope of their capabilities (Beven, 1989). In literature, very few hydrological models took into account the particularities of an agricultural Mediterranean catchment; this has led us to the development of a spatially distributed hydrological MHYDAS (Modélisation HYdrologique Distribuée des AgroSystèmes - Distributed hydrological modelling of agrosystems) (Moussa *et al.*, 1998), that attempts to take into account the main characteristics of farmed catchments.

A major consideration in the development of our flood event model was to take into account the role of ditches network, field limits and tillage practices during flood events in Mediterranean zone. The second consideration was the ability to assess the model simulations both against measured data and against qualitative field observations in order to ensure that the model is working well (or poorly) for the right reasons.

## THE STUDY AREA

The elementary basin of Roujan is located in the Hérault valley Southern France, about 60 km west of Montpellier. It is almost entirely covered by the vineyards and has a surface area of 91 ha between 75 m and 125 m above sea level. Silty clay loam forms the top soil of the catchment. Four geomorphological and

topographical domains were distinguished within the catchment area : central depression, glacis, terraces and plateau. Soils and geological outcrops differ markedly between these topographical domains. Terraces are usually about 1 m to 3 m high and 10 m to 50 m length, and have a man made containing wall of limestone (Andrieux *et al.*, 1993). The drainage network is formed by man made ditches and generally follows agricultural field limits.

The climate is Mediterranean with a mean annual precipitation of nearly 650 mm, showing a bimodal distribution with two rainfall peaks one in spring and the other in autumn. The precipitation is usually of high intensity and short duration. The mean annual temperature is about 14°C and mean annual Penman evapotranspiration of 1090 mm.

The major runoff events are usually caused by high-intensity, short-duration storms, and the hydrologic response is dominated by Hortonian overland flow with subsurface processes being relatively unimportant. Rainfall intensity and the initial soil moisture state are the main factors affecting runoff production. The proportion of base flow is relatively small in each flood event.

The catchment is equipped with one meteorological station, four rain gauges, one streamflow recorder at the outlet of the catchment, two streamflow recorders at the outlet of fields (surface of 1300 m<sup>2</sup> and 3600 m<sup>2</sup>), eight tensio-neutronic sites, seventeen piezometers and twenty monitoring sites of water geochemistry. These preliminary investigations were designed to identify the magnitude and the spatio-temporal variability of main hydrological processes. It also allowed to test the accuracy and the reliability of the equipments (Voltz *et al.*, 1994).

## MODEL DESCRIPTION

The model (MHYDAS) we developed consists of a series of interconnected hydrological units, each representing a specific portion of the area of the entire catchment. The interconnection between the units form a treelike structure which reflects the main drainage pattern and the topography of the basin. Units differ in the size, topographic features and soil properties of the area units represented by them and are connected to the channel network.

Over each unit the hydrological model incorporates Hortonian mechanism of surface runoff. Infiltrated water is assumed to flow vertically through an unsaturated layer from where it can flow downslope. The infiltration rate and volume as well as the rainfall excess are computed for each element using a relation based on an equivalence between the Green and Ampt and Horton capacity equations. The diffusive wave scheme is used for routing discharge through the ditches network. Evaporation is not represented since the purpose of the model is to simulate individual events.

Each unit in the model is composed of a number of elements that transform the unit's inputs into a single output in the form of a unit outflow hydrograph. This outflow hydrograph is the sum of the surface outflow hydrograph and the channel output hydrograph. The program starts with the upstream exterior units, and proceeds to the downstream units. The computation ends in the most downstream unit having its outlet at the outlet of the catchment.

The first step was to develop a set of computer programs that generate a network interconnected elements on a surface defined from Digital Elevation Models (DEMs) and then to subdivide the catchment into hydrological units (Lagacherie *et al.*, 1996). DEMs were derived from different data layers obtained from low altitude aerial photographs. Then, we used the ARC/INFO command *createtin* (ESRI, 1992) to merge the different layers in Triangular Irregular Networks (TIN). Gridded DEMs were computed by linear interpolation in triangle facets. The grid size of the DEMs was fixed at 2 m to avoid losses of DEM quality because of the grid resolution.

In this application, the hydrological units were defined as subcatchments. Subcatchments were delineated using the ARC/INFO GRID procedures. The ditches network was registered in the field and converted into an ARC/INFO line coverage. DEMs was combined with the ditches network coverage to build a flow direction grid that takes into account both the directions of flow given by the topography and the directions of flow imposed by the man-made ditches. Finally, the subcatchments of each node of the ditches network were delineated using the GRID function *watershed*. Figure 1a shows the ditches network and Figures 1b the subcatchments we obtained using the procedure described before.

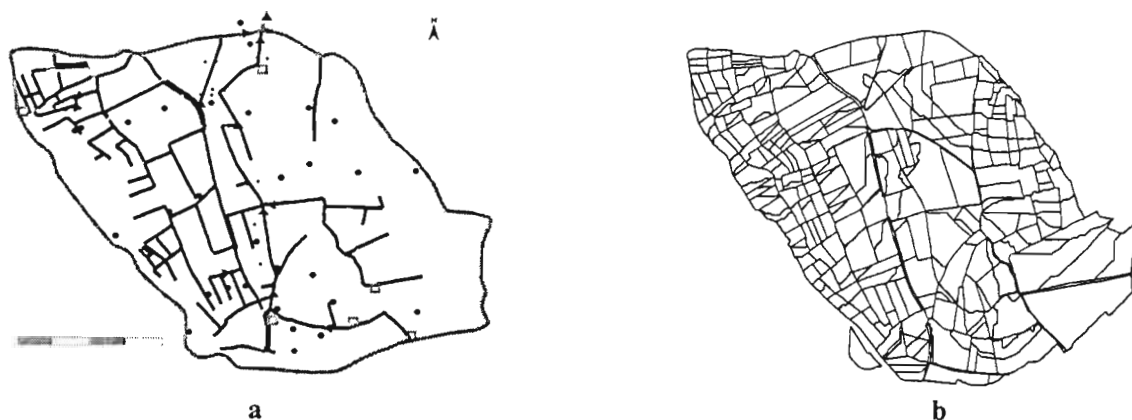


Fig. 1: The Roujan catchment.

a) The ditches network.

b) Subdivision into hydrological units (here subcatchments).

The ditches network was divided into reaches corresponding to the part of the channel between two nodes. Each reach of the ditches network is characterised by geometric properties either derived from DEM (length, slope or elevation range) or measured on field (cross sectional area of the flow). Each subcatchment has physiographic characteristics of area, elevation range, mainstream length and mean slope, and is connected to a reach of the channel network.

## THE MODEL HYDROLOGICAL COMPONENTS

### Determination of infiltration rate and effective rainfall

Because of its physical basis and good previous performance, we have adopted the pounding time formula proposed by *Morel-Seytoux (1982)*. Before pounding, infiltration rate equals precipitation rate and excess rainfall is equal to zero. After pounding, and while a pounded condition lasts, infiltration rate equals capacity infiltration rate and excess rainfall equals rainfall rate minus capacity infiltration rate. Pounding time occurs at the saturation of the soil surface and acts as a threshold determining which physical process should be considered to describe infiltration and is defined as

$$t_p = t_0 + \frac{1}{r_j} \left( \frac{S_f}{r_j^* - 1} - W_{j-1} \right) \quad (1)$$

where  $t_p$  is the time of pounding,  $t_0$  is the time at the beginning of the current time step,  $r_j$  is the rainfall rate during the current time step,  $S_f$  is the storage-suction factor,  $r_j^*$  is the normalised rainfall rate and  $W_{j-1}$  is the cumulative infiltration depth since the beginning of the current continuous rainfall up to time  $t_0$ . The normalised rainfall rate in Equation (1) is defined as

$$r_j^* = \frac{r_j}{K_s} \quad (2)$$

where  $r$  is the rainfall rate and  $K_s$  is the hydraulic conductivity at natural saturation. The storage-suction factor is a composite factor affecting pounding and the infiltration process. Its value can be computed as

$$S_f = (\theta_s - \theta_i) H_c(\theta_i) \quad (3)$$

where  $\theta_s$  is water content at natural saturation,  $\theta_i$  is mean initial water content in an upper soil layer and  $H_c(\theta_i)$  is the effective capillary drive, a quantity which only slightly depends upon the initial water content and can be estimated by the formula (*Morel-Seytoux, 1982*)

$$H_c(\theta_i) = \left[ 1 - \left( \frac{\theta_i - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^6 \right] H_c \quad (4)$$

for  $\theta_i \geq \theta_r$ . In this equation,  $H_c$  is the maximum value of  $H_c(\theta_i)$  which is attained for  $\theta_i = \theta_r$  with  $\theta_r$  being the residual water content, a water content below which water is no longer mobile in liquid form.

During rainfall periods the pounding time is computed for each subsection of the catchment. Pounding may occur in different units during different time steps. In this way the area contributing to surface runoff may change in time, expanding or contracting. The capacity cumulative infiltration depth is computed by the equation

$$\frac{K_s}{\beta} (t_v - t_p) = W_v - W_p - \left[ S_f + W_p \left( 1 - \frac{1}{\beta} \right) \right] \ln \left( \frac{S_f + W_v}{S_f + W_p} \right) \quad (5)$$

In this equation  $K_s$  is the hydraulic conductivity at natural saturation,  $\beta$  is a viscous correction factor (between 1 and 1.7),  $t_v$  is time at the end of current time step,  $t_p$  is pounding time,  $W_v$  is cumulative infiltration depth at the end of current time step,  $W_p$  is the cumulative infiltration depth at the time of pounding,  $S_f$  is the storage-suction factor defined by Equation (3). At each time step, the effective rainfall which participate to surface runoff is calculated as the difference between total rainfall and infiltration.

### Conversion of effective rainfall to surface runoff

The rainfall excess function for each cell is converted to a surface runoff hydrograph by routing it to the proper outlet of the cell, as a two-parameter Hayami response function (*Moussa and Bocquillon, 1996*).

$$Q(t) = \frac{L}{2(\pi D)^{1/2}} \cdot \exp^{\frac{CL}{2D}} \int_0^t \text{Re}(t-\tau) \cdot \frac{\exp^{-\frac{CL}{4D} \left( \frac{L}{C\tau} + \frac{C\tau}{L} \right)}}{\tau^{3/2}} d\tau \quad (6)$$

where  $\text{Re}$  is excessive rainfall,  $L$  is the length from the centre of gravity of each hydrologic unit to its outlet,  $C$  the celerity and  $D$  the diffusivity.  $C$  and  $D$  are two parameters function of the discharge  $Q$  and depend only on the unit topography (slope, shape and roughness).

### Routing the channel inflow

The dynamic modelling of a one-dimensional unsteady flow in open channels generally uses the diffusive wave equation obtained by neglecting the acceleration terms in the momentum balance equation in the Saint-Venant system

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -C \frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (7)$$

where  $C$  and  $D$  are non-linear functions of the discharge  $Q$  and are known as celerity and diffusivity, respectively. For this problem the boundary conditions are  $Q(x,0)$  and the upstream inflow  $Q(0,t)$ .

The runoff from each subcatchment constitutes lateral inflow into each reach. For each reach, hydrographs are added at the upstream then routed through the channel network to the downstream outlet to give the full hydrograph. The complete algorithm for solving the diffusive wave equation using the Crank-Nicholson approximation was presented and discussed by *Moussa and Bocquillon (1996)*. The celerity  $C$  and diffusivity  $D$  are taken as functions of the discharge  $Q$  using the Manning formula with

$$V = \frac{1}{n} \sqrt{i} R^{2/3} \quad R = \frac{B \cdot z}{B + 2z} \quad \text{and} \quad A = B \cdot z \quad (8)$$

where  $V$  is the mean velocity,  $R$  the hydraulic radius,  $i$  the slope,  $n$  the coefficient of roughness,  $z$  the mean flow depth of a rectangular section,  $B$  the cross-sectional width and  $A$  the cross-sectional area of the flow. The two relations  $C(z)$  and  $D(z)$  used in Equations (6) and (7) are

$$Q = V \cdot B \cdot z \quad C = \frac{dQ}{dA} = \left[ \frac{5}{3} - \frac{4}{3} \frac{z}{B + 2z} \right] V \quad D = \frac{Q}{2 \cdot i \cdot B} \quad (9)$$

Each reach of the channel network has three characteristics  $i$ ,  $B$  and  $n$ . For each value of  $z$ , we calculated  $Q$ ,  $C$  and  $D$ . So each reach is characterised by two relations  $C(Q)$  and  $D(Q)$ . Then the surface runoff discharge simulated at the outlet of each unit is routed through the channel network. The total contribution of surface runoff of the whole catchment corresponds to the simulated hydrograph simulate at the catchment outlet node.

## The baseflow

Since the proportion of base flow is relatively small in each flood event, an exponential model with one parameter  $\alpha$  was used. The groundwater aquifer is represented by a reservoir; let  $z$  be the level of this reservoir. The baseflow  $Q_b$  is given by :

$$Q_b = \alpha z \quad (10)$$

At the outlet of the basin, the simulated discharge is given by the sum of the surface runoff and the baseflow.

## APPLICATIONS

Forty rainfall-runoff events were considered between 1992 and 1996. To make the problem simple, rainfall-runoff events in which the rainfall is nearly uniformly distributed over the catchment were chosen. The spatial distribution of rainfall was estimated by the Thiessen method. Twenty events were selected for calibration and twenty for validation.

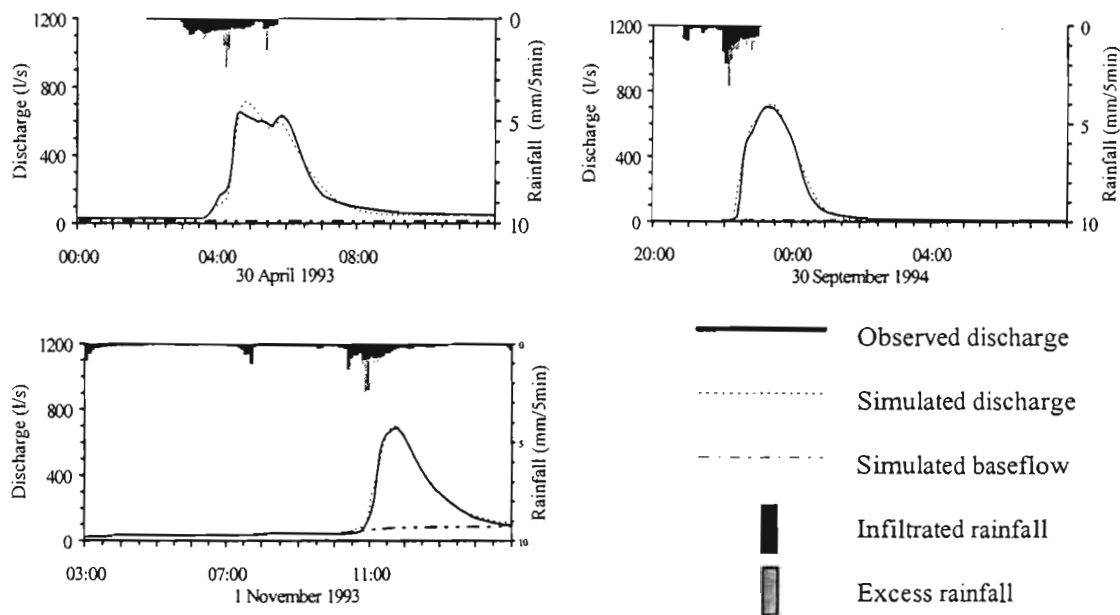


Fig. 2: Hydrographs simulated at the Roujan basin outlet.

The Manning roughness coefficient  $n$  was taken constant for all reaches ( $n=0.082$ ), the storage-suction factor  $S_f=0$ . After calibration of the parameters ( $C$ ,  $D$  and  $\alpha$ ), we obtain a mean values of the celerity  $C=0.145$  m/s, diffusivity  $D=6.5$  m<sup>2</sup>/s and the parameter  $\alpha=1.35e^{-6}$  1/s. Two sets of values for the hydraulic conductivity at natural saturation ( $K_s$ ) were considered for tilled ( $K_s=2.2$  mm/h) and untilled units ( $2.2 < K_s < 25$  mm/h).

Figure 2 shows simulated and observed results for three flood events using a time step of calculation of 1 minute. The model enables to calculate, over each hydrologic unit, the part of rainfall that contributes to overland runoff (the excess rainfall) and the part that infiltrates to the groundwater aquifer. In the three flood events studied, the water table was high, and the ditches network drains the water table, and thus provides a basic water flow. If the water table is low, it encourages replenishment of the water table by reinfiltration of runoff.

## CONCLUSION

The hydrological cycle in this farmed catchment under Mediterranean climate is dominated by intense and short rainfall events and Hortonian overland flow is the major process during flood events. Flood hydrographs are routed from each field part, through the ditches network to the catchment outlet. The

network of human-made ditches appears to serve various purposes with regard to water flows. It accelerates runoff by concentrating flows and avoiding natural obstacles.

A spatially distributed hydrologic model MHYDAS was developed to assess the role of human impact on the basin hydrology under Mediterranean climate especially the importance of the role of ditches network. The basin was subdivided into hydrologic units. Hydrologic units were defined to take into account the characteristics of the agricultural domain especially ditches network and field limits. Each unit is described by hydrological parameters that depends on soil properties and agricultural practices (tilled and untilled fields). The hydrological model is deterministic non-linear model for conversion of rainfall into surface runoff and simulates Hortonian overland flow during flood events. The model enables to simulate flood events over agricultural catchments and is useful to simulate the long term geomorphic evolution of agricultural fields especially after land use changes.

## ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the "Action Incitative Prioritaire AIP-Eau et AIP-Ecospace" of the French National Institute for Agricultural Research (INRA) and the "Programme National de Recherche en Hydrologie PNRH" of the French ministry of environment. The authors thank Olivier Huttel, Gwenn Trotoux, Christian Floure and Thierry Bourgeois for providing data. The contribution of PhD and MSc students, Philippe Bauchet, Sylvie Le Forner and Jérôme Molénat, is gratefully acknowledged.

## REFERENCES

- ABBOTT, M.B., BATHURST, J.C., CUNGE, J.A., O'CONNELL, P.E. and RASSMUSSEN, J., 1988. An introduction to the European Hydrologic System - Système Hydrologique Européen, SHE. *Journal of Hydrology*, 87, 45-59;61-77.
- ANDRIEUX, P., BOUZIGUES, R., JOSEPH, C., VOLTZ, M., LAGACHERIE, Ph. and BOURLET, M., 1993. Le bassin versant de Roujan: caractéristiques générales du milieu. *Report of the French National Institute of Agricultural Research (INRA)*, Montpellier, 35 pp.
- BEVEN, K.J., 1989. Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models, *Journal of Hydrology*, 105, 157-172.
- ESRI, 1992. *ARC/INFO User's Guide: 6.0 Surface Modeling with TIN*. Environmental Systems Research Institute, Redlands, California.
- FORTIN, J.P., MOUSSA, R., BOCQUILLON, C. and VILLENEUVE, J.P., 1995. HYDROTEL: Un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les Systèmes d'Information Géographique. *Revue des Sciences de l'Eau*, 8(1), 97-124.
- GALLART, F., LLORENS, P. and LATRON, J., 1994. Studying the role of old agricultural terraces on runoff generation in a small Mediterranean mountainous basin. *Journal of Hydrology*, 159, 291-303.
- LAGACHERIE, P., MOUSSA, R., CORMARY, D. and MOLÉNAT, J., 1996. Effects of digital elevation model source of data and sampling pattern on topographical parameters and on a topography-based hydrological model. The case of the Roujan catchment Hérault-France. *HydroGIS' 96, IAHS Publication n° 235, Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, edited by K. Kover and H.P. Nachtnebel, 191-200.
- MOREL-SEYTOUX, H.J., 1982. Analytical results for prediction of variable rainfall infiltration. *Journal of Hydrology*, 59, 209-213.
- MOUSSA, R. and BOCQUILLON, C., 1996. Criteria for the choice of flood routing methods in natural channels. *Journal of Hydrology*, 186, 1-30.
- MOUSSA R, LAGACHERIE P, VOLTZ M, ANDRIEUX P, BOUZIGUES R, LEFORNER S. 1998. Hydrological modelling of a farmed mediterranean catchment. In *Proceedings of the 16th International Congress of Sol Science*, Montpellier, 8 p.
- VOLTZ, M., ANDRIEUX, P., BOCQUILLON, C. and RAMBAL, S., 1994. Le site atelier Allegro, Languedoc. *Actes du Séminaire Hydrosystèmes, CEMAGREF*, 121-129.
- VOLTZ, M., ANDRIEUX, P., BOUZIGUES, R., MOUSSA, R., RIBOLZI, O., JOSEPH, C., and Trambouze, W., 1997. Main hydrological processes in a farmed catchment of the mediterranean area. *Ecohydrological Processes in Small Basins, European Network of Experimental and Representative Basins (ERB) and UNESCO (IHP / Division of Water Sciences)*, Strasbourg 24-26 Septembre 1996. Viville and Littlewood (Eds.). Technical Notes, UNESCO, 111-115.

# ANALYSE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UN BASSIN VERSANT LIBANAIS PAR UNE MODÉLISATION CONCEPTUELLE ADAPTÉE AU CLIMAT MÉDITERRANÉEN.

Najem W.\*, Bocquillon C.\*\* , Jabbour H.\* , Hreiche A.\*

\* *Centre Régional de l'Eau et de l'Environnement, ESIB, Université Saint-Joseph, Beyrouth, Liban.*

\*\* *Université Montpellier 2, Montpellier, France.*

## RÉSUMÉ

La connaissance de la ressource en eau des fleuves constitue un élément essentiel pour la planification et la gestion des eaux, condition importante du développement. Dans le cadre d'un programme de recherche visant à la modélisation conceptuelle globale journalière des cours d'eau en climat méditerranéen, le CREEN a testé une approche générale sur un cours d'eau côtier libanais : le Nahr Beyrouth. Cette approche s'appuie sur des hypothèses concernant les mécanismes hydrologiques : stationnarité des phénomènes hydroclimatiques, indépendance interannuelle, estimation de l'ETR par un seul paramètre calé, adaptation de la structure par analyse corrélatrice croisée. Le calage du modèle sur quatre années de données et sa validation sur quatre années ont montré des résultats satisfaisants.

## MOTS CLÉS

Hydrologie, Bassin versant, modélisation conceptuelle.

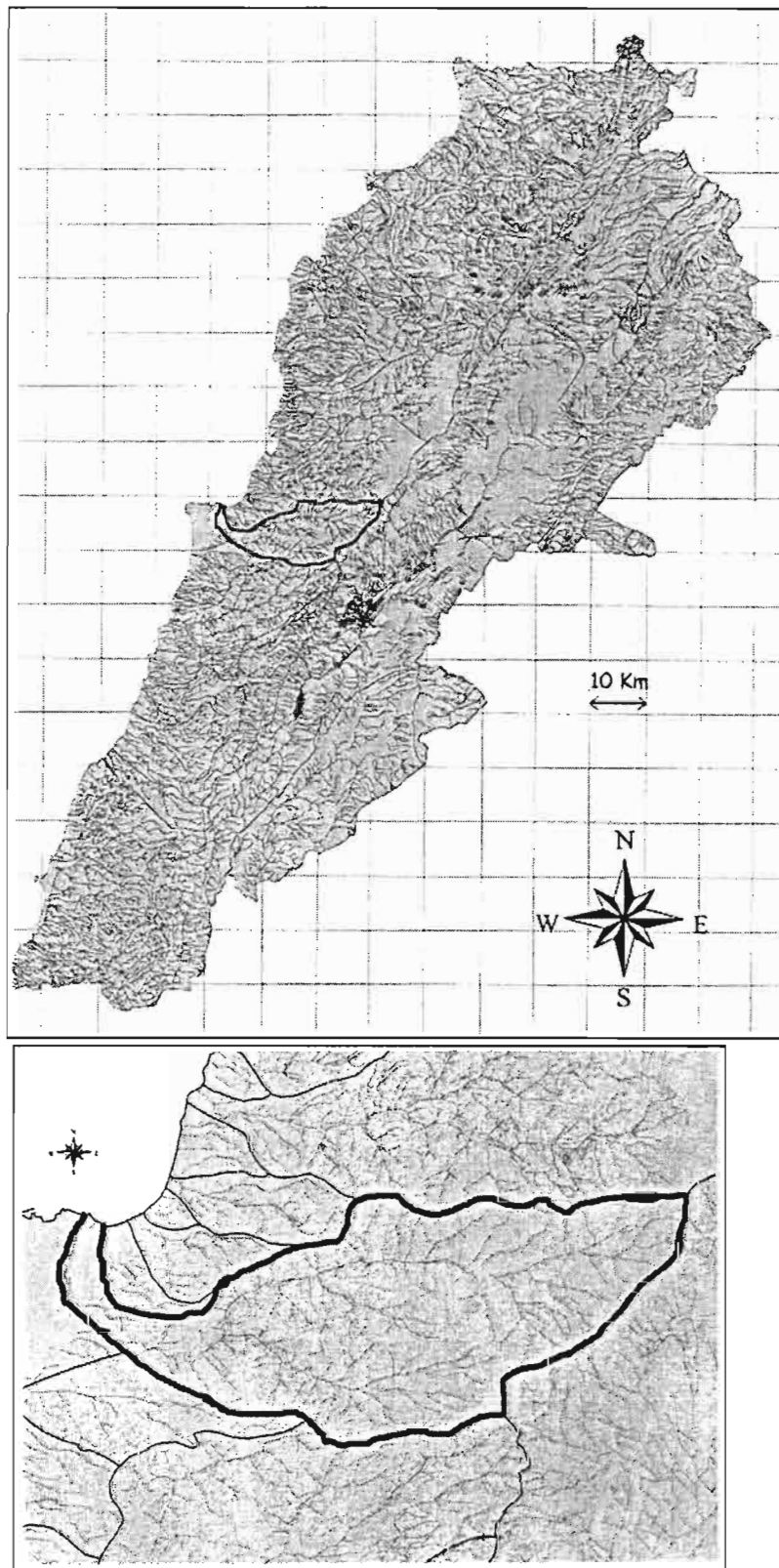
## INTRODUCTION

Situé sur la bordure, orientale de la méditerranée, le Liban (fig.1), est soumis à un climat méditerranéen, marqué par une saison sèche longue (mai à octobre) et une saison humide avec des précipitations de 800 à 2000 mm sur la façade maritime.

La zone côtière du Mont-Liban est fractionnée en un grand nombre de bassins versants dont les tailles varient de quelques dizaines à quelques centaines de km<sup>2</sup>. Le Nahr Beyrouth (fig.1), avec 230 km<sup>2</sup>, culmine à plus de 2000 mètres et se jette dans la Méditerranée dans l'agglomération de Beyrouth.

Une modélisation du transfert pluie-débit conceptuelle à l'échelle journalière a été conduite sur ce fleuve, dans le cadre d'un projet du Centre Régional de l'Eau et de l'Environnement de l'Université Saint-Joseph, avec comme objectif la constitution de séries synthétiques longues de débits à partir de la connaissance des pluies. Ce programme vise à pallier à la difficulté d'utiliser des séries de débits souvent inexistantes ou interrompues par des événements politiques. Ces séries se révèlent indispensables à la mise au point de programmes d'utilisation rationnelle des ressources en eau. Le programme ambitionne une extension à l'ensemble des bassins du pourtour méditerranéen souvent confrontés aux mêmes problèmes.





*Fig. 1 : Le Nahr Beyrouth – LIBAN Un fleuve côtier de la Méditerranée Orientale*

## MÉTHODOLOGIE

La méthode proposée consiste en une modélisation conceptuelle « à réservoirs » à paramètres optimisés. La structure, classique, est montrée en fig.2. Elle comporte un partage de la pluie moyenne sur le bassin entre un réservoir évaporatoire de contenu :  $S(t)$  et de capacité maximale  $A$  et une série de réservoirs de transfert  $R_1$ ,  $R_2$  (et éventuellement  $R_n$ ). Le coefficient de partage :  $a$  est lié au taux de remplissage du réservoir évaporatoire :  $a = 1 - (S/A)^2$ .

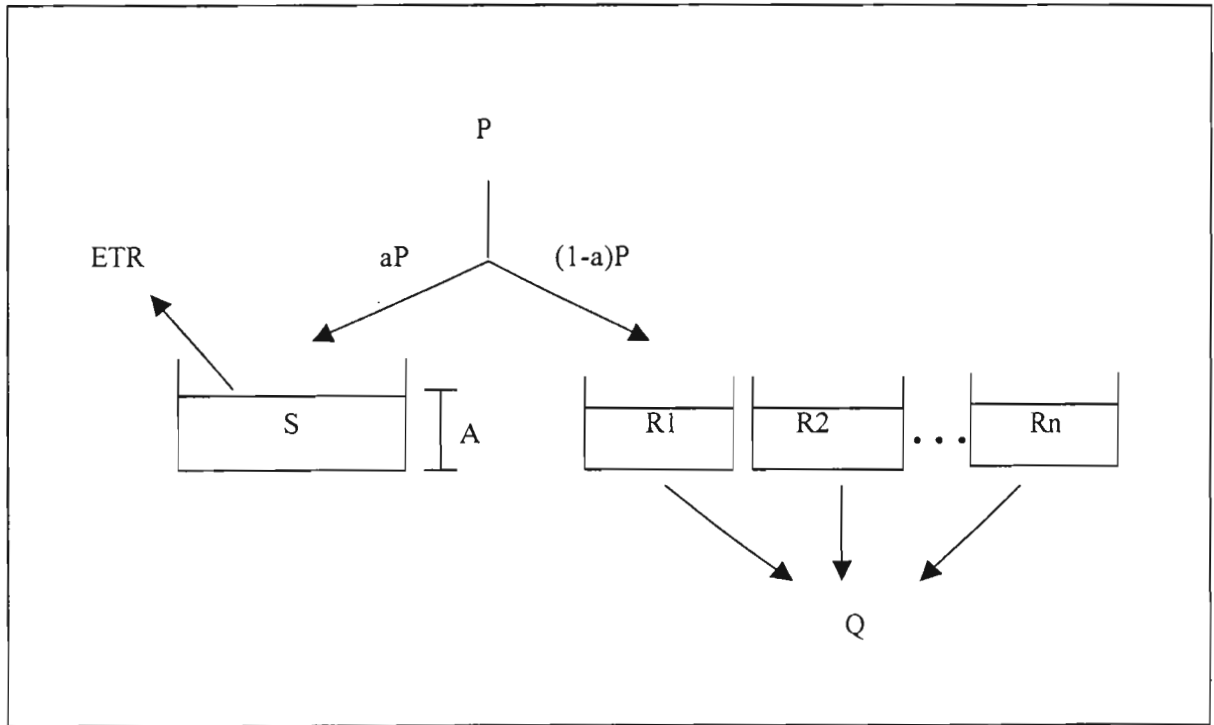


Fig. 2 : Schéma du modèle. À cette structure, très habituelle, un certain nombre de formulations ou de structurations nouvelles ont été ajoutées.

### Indépendance interannuelle

Dans le cas du bassin testé, ainsi que sur de nombreux bassins méditerranéens, les débits s'annulent sur une longue période. Divers modèles montrent que les réservoirs conceptuels passent par un même état minimum caractéristique de l'étiage. Dans ces hypothèses et à condition de débiter les années de traitement à l'étiage, la chronologie des années n'a pas à être respectée (dans le cadre des zones d'indifférence liées à la sensibilité des paramètres optimisés). Des essais de chroniques mises en désordre de façon aléatoire ont permis de vérifier cette hypothèse. Cette propriété (liée à l'existence d'une saison sèche très longue) permet d'accoler entre elles des années non successives, résultat particulièrement intéressant pour les pays ayant subi de graves interruptions de mesures.

### Reformulation de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Dans la plupart des modèles, il existe un prélèvement d'une évapotranspiration, qui n'est pas une donnée mesurée (sauf cas raréssimes), mais une estimation faite à partir de formulations diverses, du type  $ETR = k \cdot ETP \cdot f(s)$  ;  $k$  : facteur végétatif ;  $ETP$  : donnée climatique ;  $f(S)$  : fonction de l'état hydrique du milieu.

Dans les conditions des bassins libanais, le facteur prépondérant des variations de l'ETR est l'état hydrique. L'ETP est très aléatoire dans le temps et l'espace ; le facteur  $k$  est inconnu et doit être ajusté de façon optimale. Ainsi il est possible d'exprimer l'ETR sous la forme  $ETR = k_0 \cdot ET_0 \cdot g(s)$ .  $k_0$  : paramètre optimisé –  $ET_0$  : moyenne interannuelle régionale de l'ETP et  $g(s) = S/A$ .

### La détermination du nombre de réservoirs de transfert.

Les réservoirs de transfert constituent une série de filtres numériques pour le signal d'entrée de pluie nette. Quelque soit la formulation des sorties de ces réservoirs, ils sont caractérisés par des temps caractéristiques

qui modulent la relation pluie-débit. L'analyse corrélatoire croisée est la méthode la plus appropriée pour la recherche de ces temps caractéristiques. Un lissage des signaux est nécessaire pour éliminer le trop grand nombre de valeurs nulles du signal de pluie. Un lissage de 7 jours a été fait sur les données avant le traitement par Analyse corrélatoire croisée. Les résultats présentés en fig.3 montrent l'existence de 2 pics significatifs ; le premier, sur le premier pas correspond à un écoulement rapide ; le second est sur le 7<sup>ème</sup> pas soit avec un décalage compris entre 42 et 49 jours.

Ces résultats ont été retrouvés année par année, ou avec des regroupement d'années.

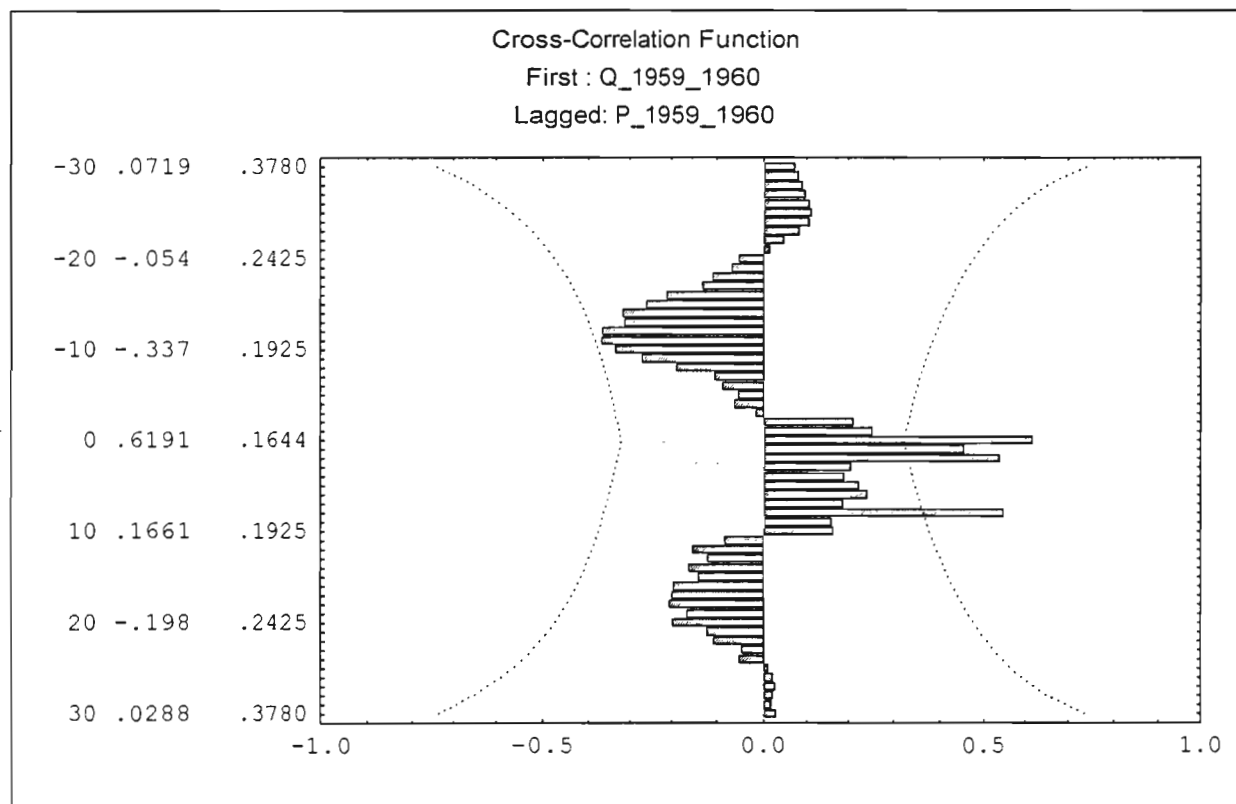


Fig.3 – Analyse corrélatoire croisée pluie-débit  
Nahr-Beyrouth 1959-1960  
Avec intervalle de confiance à 90%

Cette analyse permet de structurer le transfert avec 2 réservoirs qui seront choisis : le premier quadratique, le second linéaire. La modélisation conceptuelle ne permet pas de comprendre les mécanismes. On peut cependant se poser la question de la signification physique de ce second réservoir présentant un décalage temporel de 45 jours environ. Deux hypothèses peuvent être formulées : un tarissement retardé lié à la nature géologique (région karstique), ou une fusion des importants stocks neigeux du haut bassin. Le fait d'avoir trouvé ce même décalage sur d'autres bassins enneigés au Liban ou en France, nous incite à privilégier la seconde hypothèse.

### La gestion numérique

L'écriture mathématique des relations entre les flux et les stocks s'exprime sous forme d'équations différentielles de type :  $\frac{dV}{dt} = S(V) - E(t)$

V étant le stock, S le flux de sortie, E(t) le flux entrant.

La gestion numérique correcte de ce système est assez délicate. Dans notre travail, le logiciel Vensim a été utilisé. Ce logiciel a été conçu spécialement pour gérer des relations de ce type. Il s'est révélé particulièrement efficace. L'élimination des erreurs de calcul a nécessité une méthode de Runge-Kutta du quatrième ordre à pas fin (1/4 du pas de gestion). L'optimisation a été faite par diverses méthodes (Powell, grille).

## Le critère d'optimisation

Le critère d'optimisation généralement utilisé est le critère de Nash :

$$N = 1 - \frac{\sum (q_{obs} - q_{mes})^2}{\sum (q_{moyen} - q_{obs})^2}$$

En raison des erreurs de mesures importantes constatées sur les hauts débits, un critère différent a été retenu.

$$M = 1 - \frac{\sum (q_{obs} - q_{mes} \cdot f)^2}{\sum (q_{obs})^2}$$

f est un facteur de correction  $f = 1 / (1 + 0.015 \sqrt{q_{obs}})$

## RÉSULTATS

Huit années de mesures ont été utilisées : quatre années pour déterminer les paramètres (calage) ; quatre années pour vérifier la qualité (validation).

Les figures 4 et 5 montrent les simulations obtenues sur 2 années dans ces hypothèses. Les résultats sont corrects.

La méthode conceptuelle à réservoirs s'avère efficace dans des conditions particulièrement difficiles : données discontinues, valeurs des forts débits douteuses. Ces conditions sont fréquentes sur le pourtour du bassin méditerranéen et la méthode va être appliquée à un ensemble important de bassins, pour dégager les caractères généraux d'une modélisation spécifique au climat méditerranéen.

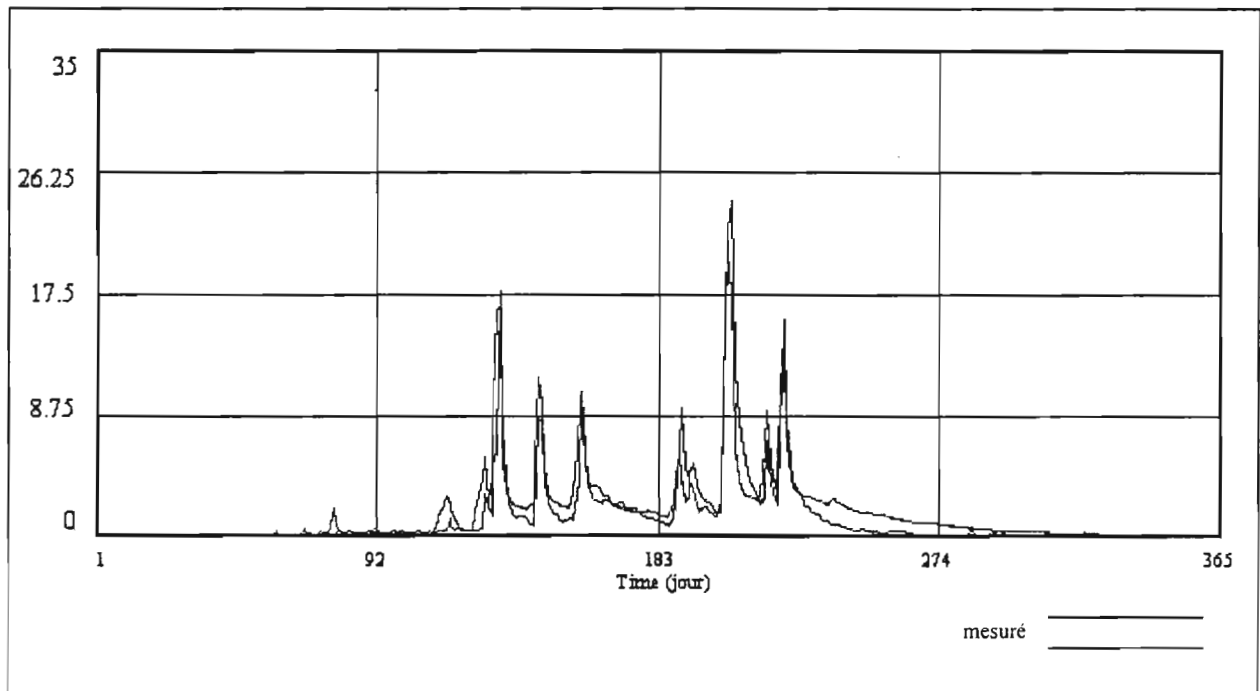


Fig. 4 – Simulation de l'année de calage 1959-1960

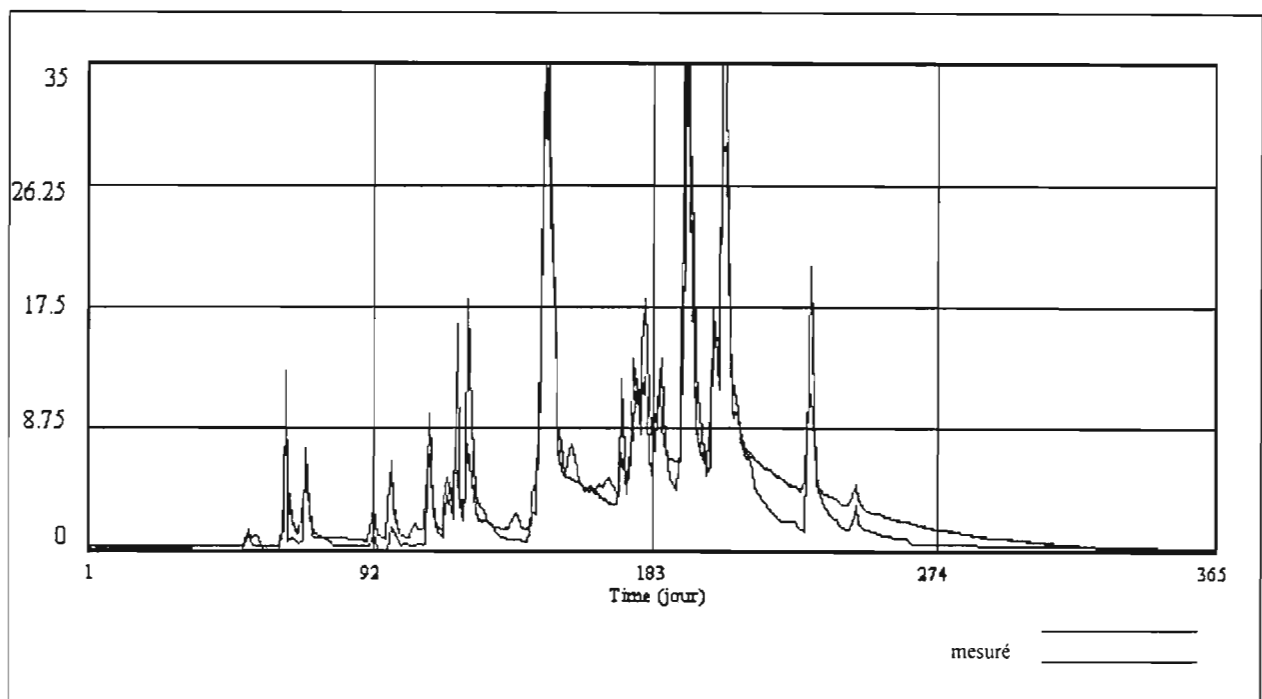


Fig. 5 – Simulation de l'année de validation 1969-1970

# **SIMULATION ET OPTIMISATION DE LA GESTION STRATEGIQUE - CAS D'AMENAGEMENTS A BUTS MULTIPLES DU SUD DE LA FRANCE**

Pouget J.C.\*, Astier J.\*\*\*, Le Goulven P.\*, Rocquelain G.\*

\* IRD MSE - BP 5045 - 34032 Montpellier Cedex 1

\*\*\* BRLi - BP 4001 - 30001 Nîmes Cedex

## **RESUME**

Pour améliorer la gestion de systèmes de réservoirs, il est important de définir des stratégies qui prennent en compte la variabilité hydrologique. Une des stratégies est d'utiliser les modèles de simulation pour régler des consignes de gestion sur de longues chroniques de données hydro-climatiques, considérées comme représentatives. La vérification des objectifs se fait a posteriori. L'optimisation de la gestion stratégique nécessite, elle, une formalisation a priori des objectifs, qui passe par l'attribution de coûts à l'eau suivant la position où elle se trouve. Cette optimisation vise à définir, sachant un état des réserves, les meilleures allocations des ressources à moyen terme, donc en avenir incertain. La longueur de l'horizon décisionnel considéré est fonction des stockages en jeu.

Afin de tester l'application de ces stratégies, nous avons développé un environnement d'aide à la décision qui permet de simuler la gestion opérationnelle des systèmes, en intégrant les niveaux de décision stratégiques et tactiques, et d'évaluer leurs performances. Les modèles d'optimisation de la gestion stratégique utilisent des algorithmes de programmation linéaire, avec des horizons décisionnels plus ou moins complexes. Dans le projet européen WARSYP, par exemple, il a été introduit des algorithmes d'optimisation portant sur un arbre de scénarios, généré pour représenter la stochasticité des apports et des demandes.

Nous présenterons l'application de différentes stratégies à la gestion du système Montagne Noire - Lauragais. Les aménagements, qui comprennent 6 réservoirs et des connexions inter-bassins, servent à l'alimentation en eau potable, à l'irrigation, aux loisirs, à la navigation sur le Canal du Midi, etc. Nous évaluerons la robustesse de différentes options : longueur et modes de génération de l'horizon décisionnel, sensibilité aux paramètres de gestion, etc.

## **INTRODUCTION**

Les systèmes de réservoirs sont constitués d'éléments de stockage tant superficiels que souterrains, d'éléments de captage, de transport naturels, artificiels, d'utilisation et de consommation d'eau. La complexité de ces systèmes tient à l'implication d'un grand nombre d'acteurs avec différents objectifs et stratégies.

Nous allons détailler ces stratégies pour la gestion opérationnelle de ces systèmes, qui peuvent allier simulation et optimisation des ouvrages. Nous présenterons ensuite brièvement les bases de l'environnement d'aide à la décision que nous avons développé afin d'approcher la réalité de la gestion des systèmes d'eau.

Nous illustrerons notre propos avec la modélisation du système Montagne Noire - Lauragais et des tests de sensibilité sur différents aspects de l'optimisation de la gestion stratégique.

## **LA GESTION OPERATIONNELLE - SIMULATION ET OPTIMISATION**

La gestion opérationnelle consiste pour un ensemble d'ouvrages existant à régler le fonctionnement des organes de commande, fonctionnement qui va conditionner les flux d'eau dans le système [VALIRON 1988]. Mais, dans le fonctionnement de systèmes où la décision de lâchers sur des réservoirs peut influencer grandement le respect d'objectifs sur un futur plus ou moins lointain suivant les stockages en jeu, il est important de définir des stratégies qui prennent en compte l'aléa climatique.

### **Etablissement des consignes de gestion par simulation**

Une des stratégies est d'utiliser les modèles de simulation pour tester des consignes de gestion sur de longues chroniques de données hydro-climatiques, considérées comme représentatives. La vérification des objectifs se fait a posteriori, notamment par l'analyse d'apparition de défaillances et leur répartition (fiabilité), de l'ampleur des déficits (vulnérabilité) et de la durée des pénuries (flexibilité). Les consignes de gestion vont être modifiées, au fur et à mesure des simulations, pour améliorer la satisfaction des objectifs. Il y a

apprentissage, par l'utilisateur du modèle de simulation, de la réponse du système, par un processus du type essais-erreurs. L'objectif est de se rapprocher de la réalité de l'application des consignes d'où la nécessité de simuler au pas de temps journalier ou décadaire pour ne pas lisser des phénomènes.

Les consignes de gestion peuvent être plus ou moins complexes. Elles font généralement référence à des priorités de distribution de demandes et une hiérarchisation de la mobilisation des ressources. La mobilisation s'effectue en respectant les courbes de remplissage et de vidange des réservoirs. La définition du niveau objectif tiendra notamment compte de la constitution d'un creux pour l'amortissement des crues.

Cet établissement des consignes de gestion par simulation demande le savoir-faire du gestionnaire du système pour équilibrer la satisfaction des objectifs et peut être difficile à mettre en oeuvre lors de changements structuraux importants ou sur des cas complexes.

### Approche intégrée de la gestion opérationnelle

La *figure 1* présente les nombreuses collaborations que peut impliquer la gestion au niveau de l'ensemble d'un bassin. Trois couches de décision peuvent être identifiées [JAMIESON 1986] : les décisions stratégiques, tactiques et de contrôle local. Elles peuvent correspondre à divers gestionnaires, un gestionnaire central, des gestionnaires de sous-systèmes, des gestionnaires d'ouvrages. Les décisions stratégiques définissent ce qui doit être fait à moyen terme en termes d'allocations de ressources ; des modèles d'optimisation sur des mois futurs sont utilisés. Les décisions stratégiques conditionnent les modèles de gestion tactique qui correspondent à des décisions à court terme, en journalier généralement.

Les décisions tactiques servent à régler le fonctionnement des organes de commande, qui correspond à un contrôle en temps réel, généralement asservi par des automatismes. Des boucles de rétro-action peuvent exister entre ces modes de décision pour prendre en compte des écarts entre directives et réalité.

Cette approche intégrée de la gestion opérationnelle couple en fait modèles d'optimisation et de simulation, en détaillant plus ou moins les processus physiques à divers moments du procédé de prise de décision [Journal of Hydrology 1996].

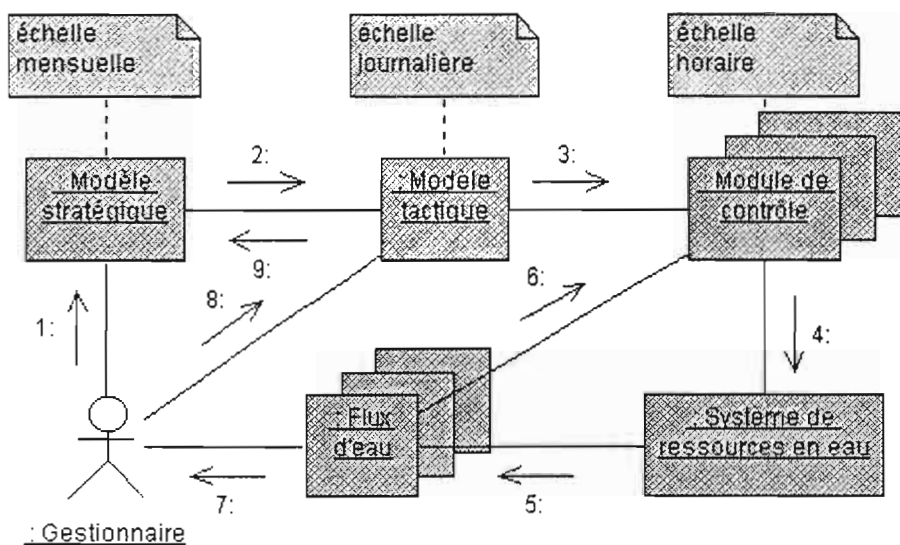


Fig. 1 - Collaborations possibles dans la gestion opérationnelle d'un bassin

L'optimisation va impliquer de transformer le système d'eau réel en un réseau fictif d'arcs (arcs de surface, biefs naturels, etc) et de noeuds (réservoir, jonction, demande consommatrice et non consommatrice, aquifère, etc). Le problème consiste à minimiser une fonction objectif composée de termes pénalisation et de coûts sur un horizon décisionnel, sachant les conditions formulées dans les équations relatives aux divers composants. Les termes de pénalisation sont relatifs aux déficits ou aux déviations par rapport à des niveaux objectifs (courbe objectif d'un réservoir, niveaux de demandes en eau, etc). Les termes de coûts sont relatifs au transit de surface et aux pompages de surface ou dans les aquifères. Le stockage dans les réservoirs et les

aquifères et la limitation des déficits cumulés des demandes nécessitent un couplage multipériodes, qui conduit à l'adoption d'un modèle complexe de résolution d'équations linéaires [WARSYP 2000].

Les simplifications introduites par l'utilisation d'algorithmes de programmation linéaire sont acceptables au regard de l'incertitude sur le futur à prendre en compte pour la satisfaction des objectifs. Dans le projet européen *WARSYP* par exemple, un des objectifs était de traiter l'incertitude sur le futur par la représentation avec un arbre de scénarios stochastiques. L'avantage de ces méthodes, même si c'est une de leur principales difficultés, réside dans la formalisation des objectifs.

On note l'importance du recours à un modèle de simulation, reproduisant l'approche intégrée des prises de décisions stratégiques et tactiques, notamment pour la phase de test du mode d'optimisation de la gestion stratégique. La robustesse de différentes options peut être évaluée : mode uniquement déterministe avec un horizon prévisionnel plus ou moins grand (on peut se placer dans le cas irréaliste mais optimal où le futur est connu, puisque l'on va simuler sur des données historiques), complexité plus ou moins grande d'un arbre de scénarios stochastiques, etc.

### Les bases d'un environnement d'aide à la décision

Notre développement vise un environnement pour l'aide à la gestion des ressources des eaux au sens large, allant de la planification à long terme jusqu'à l'optimisation de la gestion opérationnelle [POUGET 1999]. Cet environnement doit être assez ouvert pour recourir, suivant les prises de décision, à différentes technologies, optimisations et simulations plus ou moins complexes de processus physiques. Plusieurs types d'utilisateurs peuvent faire appel à des degrés divers aux trois grandes fonctionnalités de l'environnement, présentées sur la figure 2 :

- *la construction de systèmes d'eau*, de nouveaux systèmes d'eau peuvent être construits, on peut ajouter de nouveaux composants ou modifier la structure physique ou les consignes de gestion de systèmes existants ;
- *la simulation et/ou l'optimisation de la gestion opérationnelle*, il est possible de simuler le fonctionnement des systèmes d'eau sur une longue période de données hydro-météorologiques, à des pas de temps variables et suivant différents modes de gestion, intégrant des priorités de desserte en eau et des règles de mobilisation des ressources ;
- *l'évaluation des performances*, la fiabilité, la vulnérabilité et la flexibilité des systèmes peuvent être étudiées par rapport à la satisfaction de divers objectifs.

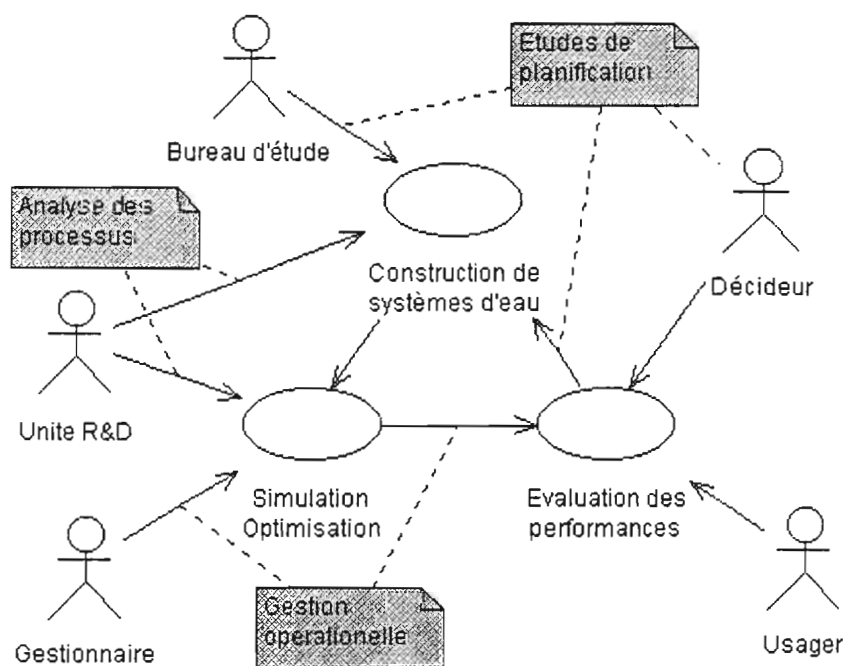


Fig. 2 - Les grands cas d'utilisation



Le développement est donc basé sur la représentation et la simulation de fonctionnement de bassins aménagés, qui constituent des systèmes fortement structurés. L'approche objets permet une modélisation aisée de cette structure, qui fonde l'architecture du développement et assure la continuité de l'évolution. Au gré des besoins, diverses versions de modèles opérationnels peuvent être produits, où de nouveaux types de composants de systèmes d'eau, de nouvelles fonctionnalités d'analyse peuvent être ajoutés, des processus physiques plus ou moins complexes peuvent être détaillés, etc [LE GOULVEN 2000].

## APPLICATION AU SYSTEME MONTAGNE NOIRE - LAURAGAIS

### Description

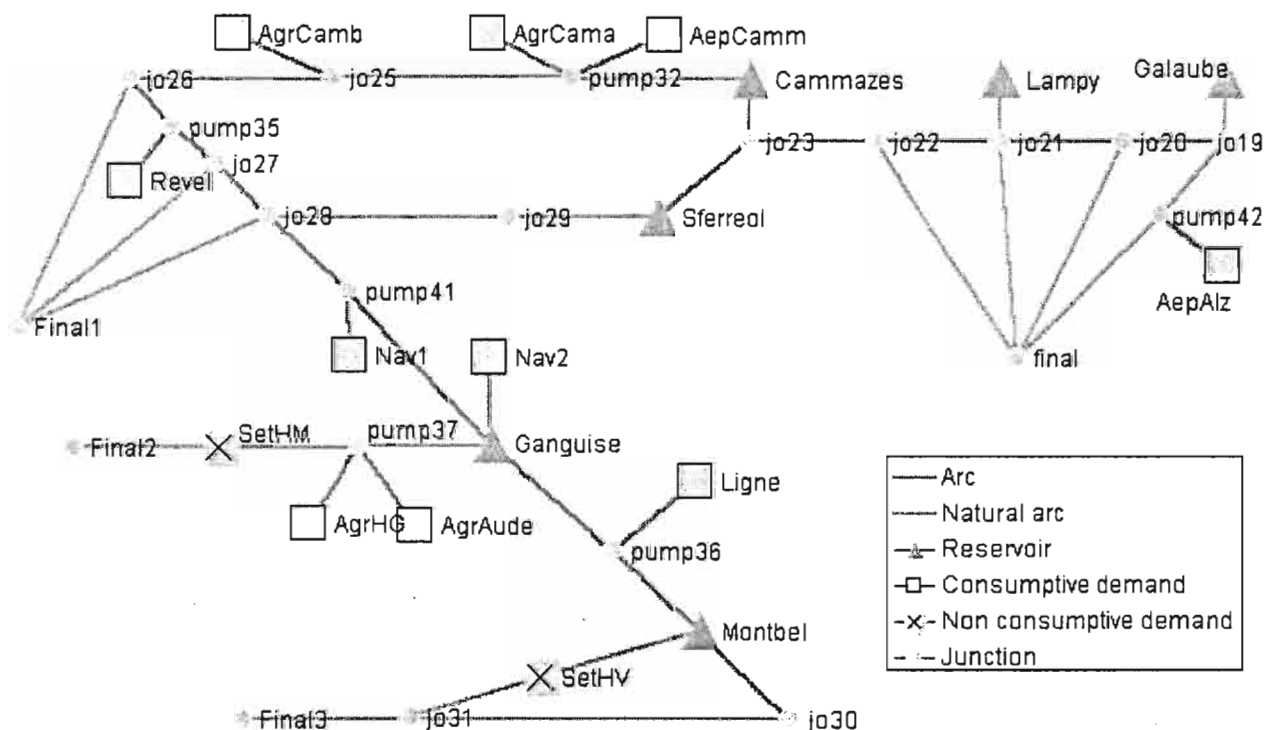
Le système est situé dans le sud ouest de la France entre la Montagne Noire et les pieds des Pyrénées. Ce système possède donc un versant atlantique et un versant méditerranéen, il recouvre ainsi 2 agences de bassin (Rhône-Méditerranée-Corse et Adour-Garonne) et 8 organismes de gestion.

Les aménagements comprennent 6 réservoirs (Saint Ferréol 6.4 hm<sup>3</sup>, Lampy 1.7 hm<sup>3</sup>, Cammazes 18.8 hm<sup>3</sup>, Ganguise 24.7 hm<sup>3</sup>, Montbel 60 hm<sup>3</sup>, Galaube 8 hm<sup>3</sup>) et des connexions inter-bassins au niveau du seuil de Naurouze.

Ces aménagements servent à l'alimentation en eau potable, à l'irrigation, aux loisirs, à la navigation sur le Canal du Midi, au maintien de débits réservés dans les cours d'eau. Les besoins urbains et industriels couvrent 45 millions de m<sup>3</sup> par an. Les projets prévoient l'extension de la zone irriguée (3000 ha par an) et l'augmentation de la desserte en eau potable (2 hm<sup>3</sup> par an).

### Modélisation

Nous avons modélisé le système sous forme d'arcs - arcs de surface pour les canaux, les conduites, arcs naturels pour les biefs de rivière - et de noeuds - réservoirs, demandes consommatrices pour les demandes en eau potable, agricoles et de navigation, demandes non consommatrices pour modéliser certains soutiens d'étiage, jonctions pour les confluences, captages d'eau, apports intermédiaires, etc -.



Nous avons adopté la même priorité pour toutes les demandes dites écologiques au niveau des arcs naturels, à savoir une valeur de pénalité de 1 pour le non respect du débit réservé.

Nous différencions les demandes de navigation, agricoles et d'eau potable, avec une priorité croissante. Nous distinguons 3 niveaux pour chaque demande.

Demandes	Pénalité 1	Pénalité 2	Pénalité 3
Navigation : Nav1	1	1.5	2
Agriculture : AgrCama, AgrCamb, AgrHG, AgrAude, Ligne + Navigation : Nav2	2	3	4
Eau potable : AepAlz, AepCamm, Revel	4	6	8
Soutien d'étiage : SetHV, SetHM	5	7.5	10

Pour chaque réservoir, nous distinguons 2 zones et un volume objectif égal à la capacité de stockage maximale de mai à septembre avec des pénalités négatives plus grandes dans cette période. Les pénalités positives et négatives sont relativement faibles (de l'ordre de 0.001, 0.01). Ces pénalités sont les mêmes pour tous les réservoirs, à l'exception de Saint Ferréol où les pénalités sont augmentées par un facteur 10 pour tenir compte de la demande de loisir pour ce plan d'eau.

### Les simulations

Nous avons simulé l'application de décisions tactiques conditionnées par l'optimisation de la gestion stratégique sur les chroniques d'apports (65 ans) considérées comme représentatives.

Pour chaque mois, l'outil génère un fichier de description du système, exécute le modèle d'optimisation et lit les débits dans les arcs dans un fichier de résultats pour le premier mois de l'optimisation. L'outil simule le fonctionnement du système conditionné par ces débits stratégiques optimisés au pas pas de temps tactique avec les données historiques d'apport.

Différentes simulations ont été menées avec des optimisations de la gestion stratégique sur des horizons déterministes constitués des valeurs historiques des apports. Ces simulations nous placent dans le cas irréaliste d'un futur complètement prédictible. Ces simulations fournissent une référence de comparaison.

Ces tests ont été en particulier utilisés pour calibrer les coefficients de pénalités et pour déterminer la longueur de l'horizon décisionnel. Les résultats sont exactement les mêmes si nous considérons un horizon décisionnel de 1 ou 2 ans. Aussi nous ne présentons que les résultats des simulations basées sur un horizon déterministe avec un horizon décisionnel de 12 mois.

Nous ne présentons que les résultats globaux sur les déficits de demande en eau où nous distinguons demande consommatrice (C), demande non consommatrice (NC) et demande écologique (E) et les valeurs suivantes :

- 1- déficit total : pourcentages de déficit sur la totalité de la période simulée ;
- 2- déficit max annuel : pourcentages de déficit sur l'année avec le maximum de déficit pour les demandes consommatrices ;
- 3- plus long déficit : pourcentages de déficit sur la période la plus longue avec des déficits consécutifs pour les demandes consommatrices, nous donnons le premier mois et le nombre de mois consécutifs ;
- 4- déficit max mensuel : pourcentages de déficit sur le mois avec le maximum de déficit pour les demandes consommatrices.

Pour 2-3-4, nous nous référons au déficit maximum pour les demandes consommatrices et nous présentons les valeurs correspondantes pour les demandes non consommatrices et écologiques.

Les résultats suivants R1.1 correspondent à une simulation mensuelle basée sur des optimisations sur des horizons décisionnels avec des valeurs historiques. R1.1 constitue la référence et un optimum pour le respect des différents objectifs. Nous notons que les déficits sont très faibles. Si nous détaillons les résultats pour chaque demande, nous observons que seul Nav1, la demande de priorité la plus faible, a connu un déficit de plusieurs mois pendant la sécheresse de 1989-90.

Référence : R1.1 - Horizon= valeurs historiques - Pas tactique= mois

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.10	0.05	0.70
déficit max annuel	1990	5.40	0.00	3.60
plus long déficit	oct 1989 - 10	5.00	7.15	5.25
déficit max mensuel	sep 1990	22.55	0.00	12.45

### Tests du passage stratégique à tactique

Les résultats suivants R1.2, R1.3 correspondent respectivement à des simulations décennales et journalières basées sur des optimisations mensuelles sur des horizons décisionnels avec des valeurs historiques. Nous notons que les résultats des demandes consommatrices et non consommatrices sont très similaires à R1.1, mais les déficits écologiques sont supérieurs. Ceci pose le problème de l'application des résultats de l'optimisation dans le fonctionnement tactique. Actuellement la solution adoptée semble trop pénaliser la demande écologique : les débits réservés sont moins respectés. Des travaux supplémentaires sont nécessaires pour la mise en oeuvre opérationnelle, avant même d'utiliser des optimisations plus complexes.

R1.2 - Horizon= valeurs historiques - Pas tactique= décade

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.95	0	10.15
déficit max annuel	1990	10.45	0	17.45
plus long déficit	nov 1939 - 21	1.4	0	6.65
déficit max mensuel	juil 1990	13.45	0	5.4

R1.3 - Horizon= valeurs historiques - Pas tactique= jour

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	1.25	0	12.75
déficit max annuel	1990	6.85	0.05	21.6
plus long déficit	jan 1979 - 91	1.25	0	12.25
déficit max mensuel	mai 1990	39.95	0	35.4

### Tests des modes de prédiction de l'horizon

Les résultats suivants R1.4, R1.5 correspondent aux simulations mensuelles basées sur des optimisations avec différents modes de prédiction des valeurs d'apports sur l'horizon décisionnel. Avec R1.4, nous considérons simplement les valeurs des premiers quartiles résultant de la classification par mois des différentes chroniques d'apports naturels. Ainsi, pour chaque mois de la simulation, l'horizon décisionnel de l'optimisation stratégique est constitué, pour chaque apport, avec les mêmes 12 valeurs saisonnières. Avec R1.5, nous avons utilisé un modèle de génération de scénario pour définir, pour chaque mois, les 12 valeurs mensuelles correspondant au scénario le plus probable, au regard d'une analyse par des réseaux neuronaux. Comme pour les tests précédents, nous notons que les résultats des demandes consommatrices et non consommatrices sont très similaires à R1.1, mais les déficits écologiques sont supérieurs. Nous notons que la prédiction utilisant les réseaux neuronaux ne semblent pas améliorer les résultats par rapport à des simples indicateurs saisonniers. Mais ce type de prédiction pourrait être très utile dans la gestion opérationnelle avec un couplage avec des prévisions météorologiques.

R1.4 - Horizon= valeurs premier quartile

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.55	0.05	9.2
déficit max annuel	1990	6.25	0	24.5
plus long déficit	déc 1989 - 7	17.25	0	52.3
déficit max mensuel	sep 1949	21.9	0	15.8

R1.5 - Horizon= valeurs générés par réseaux neuronaux

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1932 - 1996	1.30	0.00	15.55
déficit max annuel	1990	8.75	0.00	24.10
plus long déficit	sep 1989 - 16	8.00	0.00	29.55
déficit max mensuel	sep 1947	28.80	0.00	6.95

### Tests sur la régulation des canaux

L'examen des écoulements dans les arcs artificiels (canaux, conduites, etc) montre un besoin de mieux réguler leur fonctionnement. Nous obtenons ainsi des écoulements nuls durant plusieurs mois dans les canaux de la Montagne Noire.

Pour tester la sensibilité des couts de transit dans ces résultats, nous avons simulé le fonctionnement du système avec des couts de transit nuls à la place des valeurs très faibles précédemment utilisées (0.001). Nous notons que les résultats globaux R1.6 sont très similaires aux résultats de référence R1.1. Mais si nous détaillons les résultats, nous observons un nombre plus grand d'années avec des déficits. En particulier le déficit de la demande en eau potable Alzeau est inattendu au regard de sa priorité.

R1.6 - Horizon= valeurs historiques - cout de transit = 0

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.25	0	0.75
déficit max annuel	1943	6.25	0	0.25
plus long déficit	août 1943 - 1	29	0	2.5
déficit max mensuel	août 1943	29	0	2.5

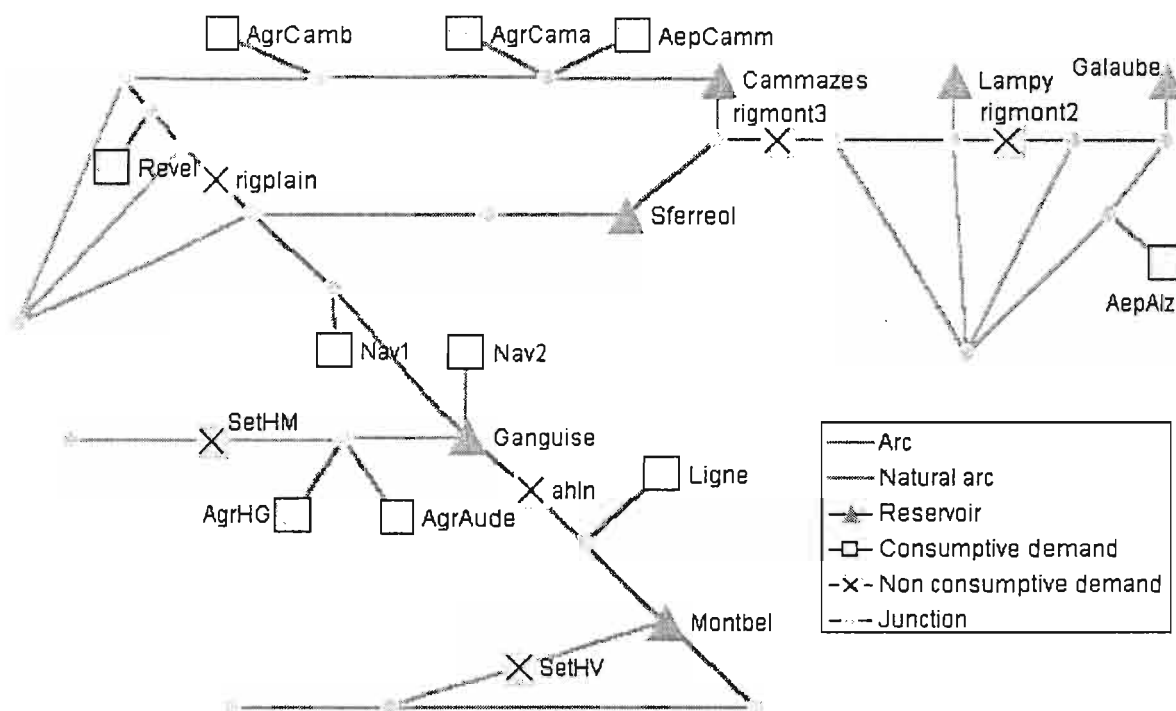
Ainsi une solution est d'introduire de nouvelles demandes non consommatrices sur certains canaux ou conduites pour réguler les écoulements. Nous avons ajoutés 4 nouvelles demandes non consommatrices (voir la figure suivante) :

- ahln, correspondant à la régulation de l'adduction de la Ganguise à partir du réservoir de Montbel ;
- rigplain, rigmont3, rigmont2, correspondant aux régulations des écoulements sur les canaux de la Montagne Noire. Nous avons réglé ces demandes en utilisant les simulations précédentes.

Les résultats suivants R2.1 correspondent à la simulation mensuelle basée sur des optimisations sur des horizons décisionnels avec des valeurs historiques. Pour comparer avec la référence R1.1, nous avons considéré uniquement les résultats de SetHV et SetHm comme demandes non consommatrices. Ces résultats, R1.1 et R2.1, sont très similaires.

R2.1 - Horizon= valeurs historiques - Pas tactique= mois

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	0.1	0	0.65
déficit max annuel	1990	3.90	0	3.4
plus long déficit	déc 1989 - 5	10.25	0	5.00
déficit max mensuel	sep 1990	13.10	0	15.85



Pour observer l'importance de l'optimisation, nous présentons les résultats suivants R2.2 correspondant à une simulation mensuelle avec des valeurs historiques et sans optimisation. Le fonctionnement du système est basé sur des règles de satisfaction des objectifs, mois par mois, sans optimisation stratégique.

R2.2 - simulation tactique - sans optimisation

-	périodes	% déficit C	% déficit NC	% déficit E
déficit total	1931 - 1995	2.75	0.27	1.7
déficit max annuel	1949	32.45	0	7.35
plus long déficit	avr 1949 - 7	38.35	0	9.80
déficit max mensuel	août 1949	46.4	0	7.8

## CONCLUSION

L'application présentée soulève volontairement certaines difficultés pour la mise en oeuvre opérationnelle de l'optimisation : passage du stratégique au tactique, choix de modes de prédiction pertinents. Il convient de faciliter la modélisation et la calibration pour la rendre accessible à des non spécialistes de l'optimisation. Les tests menés montrent le besoin de travailler plus étroitement avec les opérateurs pour les convaincre de l'intérêt de l'utilisation de l'optimisation. A cette fin, il est essentiel de disposer d'un outil d'aide à la décision

associant simulation et optimisation pour pouvoir quantifier les gains d'utilisation de méthodes plus complexes.

Les perspectives en matière de recherche et développement sont très grandes pour aboutir à des modèles de plus en plus intégrés. Nous n'avons évoqué dans notre application que l'aléa lié aux apports et non celui lié aux demandes. Il apparaît ainsi important de prendre en compte les stratégies d'agriculteurs ; la méthodologie d'optimisation sur des arbres de scénarios stochastiques développée dans WARSYP pourrait être ici utilisée avec profit. L'intégration des contraintes de qualité constitue un objectif majeur. De même, suivant les systèmes étudiés, l'intégration d'un fonctionnement plus fin des nappes souterraines, ou des temps de transfert dans les biefs, peut devenir incontournable pour une réelle gestion intégrée.

## NOTE

Ce travail est le produit d'une collaboration entre l'IRD et BRLi au sein du programme européen WARSYP, Water Resource Systems Planning, axé sur l'optimisation de la gestion stratégique des systèmes d'eau. Voir [www.mpl.ird.fr/warsyp](http://www.mpl.ird.fr/warsyp)

## BIBLIOGRAPHIE

- JAMIESON, D.G., 'An integrated, multi-functional approach to water resources management', Hydrol.Sci.Bull., dec. 86, Vol. 31, NO. 4, p 501-514
- Journal of Hydrology 1996. Journal of Hydrology, 'Special issue : Decision-support systems', VOL.177, NOS. 3-4, 1 avril 1996.
- LE GOULVEN, P. & al. 'Dynamiques, Impacts et Valorisation des Hydro-Aménagements (DIVHA)', Dossier de demande de création d'unité IRD, fév 2000, 53 p.
- POUGET, J.C., 'Conception d'un environnement générique d'aide à la gestion des ressources en eau : de l'analyse à la maquette', Rapport relatif au projet européen WARSYP, convention IRD/ORSTOM - BRLi, juin 1999, 45 p. + annexes
- VALIRON, F., *Gestion des eaux : automatisation.informatisation.télégestion*, Presses de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées, 1988, ISBN 2-85978-112-9, 551 p.
- WARSYP 2000. Projet européen WARSYP, 'Water Resource Systems Planning', Rapport final, Madrid, 31 mai 2000, 210 p.



# INTEGRATED WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE WEST BANK AND GAZA

Rabi A.\*, Karmi N.\*\*

\* *Palestinians Hydrology Group*

\*\* *GEKA (General Des Eaux / Khatib & Alami), Palestine*

## ABSTRACT

Most developing countries, especially arid and semi arid ones which, include West Bank and Gaza, have been using their water resources at rates exceeding its replenishment capacities. This has led to depleting the resources and altering their quality, which, in turn have adversely effected social, economic environmental and health situation in those countries. The current paper attempted to reflect the interrelation among, and the combined impact of, various development activities associated with population growth and the existing water resources management practices and strategies especially under uncertainties. It also tried to address the impact of none-efficient water use, the lack of attaining cost recovery and the lack of stakeholder participation on the overall water situation. It recommends an adequate level for domestic water use and defines the constraints facing the fulfillment of integrated water resources management requirements in the West Bank and Gaza. It concludes with drawing some general recommendations to mitigate the negative impact and to assist in developing general guidelines for IWRM in the West Bank and Gaza.

## KEYWORDS

Integrated water resources management, basic water needs, domestic use, aquifer, basin, conservation, ecosystem services, water scarcity, drought

## INTRODUCTION

The basic idea of integrated water resources management (IWRM) emerged as a response to the escalating depletion of Global fresh water resources in general and those of arid and semi arid regions in particular. Recent statistics indicate that world population increased by a factor of three while fresh water withdrawals increased by a factor of seven during the 20<sup>th</sup> century.

IWRM first emerged as a new concept in 1992 as a result of the deliberations of Dublin water conference. All subsequent regional and international Fora then adopted the basic principles developed in Dublin. The last world water forum assembled in the Netherlands March 2000, within the context of world water vision provided more elaboration on the principles of IWRM and suggested some guidelines for preparing its relevant plans. It was emphasized that the specific characteristics of each water system must be considered during the development of IWRM plans.

In light of these guidelines the current paper will shed lights on the Palestinian water issues from a regional perspective, at the level of the Jordan River Basin (JRB) and then scale it down to the local Palestinian water management challenges.

## WATER AT REGIONAL PERSPECTIVE

Precipitation is the main source of water resources replenishment in the JRB. Total annual precipitation volume is estimated at 16.3 bcm/year. However, only small portion of this volume, nearly 2.8 bcm/year, transforms into exploitable surface (1.36 bcm/year) and groundwater (1.44 bcm/year) resources, while the largest part is lost through evapotranspiration and runoff, NRC (1999). Temporal and spatial variation in the climate and hydrologic conditions throughout the basin has a tremendous impact on precipitation distribution and consequently on the natural distribution and variability of renewable fresh water resources. The contribution of Jordan, West Bank and Gaza, and Israel in the total surface water is 24%, 2% and 22%, respectively. While the contribution of the same countries in the total groundwater is 22.4%, 48.1% and 29.5%, respectively.



## **WATER AT LOCAL PERSPECTIVE**

### **Water Resources: Quantity and Quality**

Groundwater is the major water resources in the West Bank and Gaza. Average annual groundwater replenishment from rainfall was reported differently in the literature. However, the most acceptable estimate is the 679 mcm/year, which has been officially agreed on under the Oslo Interim Peace Agreement for the West Bank and Gaza in 1995 between the PLO for the benefit of the Palestinian Authority and the Government of Israel. Meanwhile, the total renewable groundwater resources in Gaza are 46 mcm/ year, MOPIC (1996).

According to the directions of groundwater flow, the West Bank groundwater system can be divided into three major basins as follows: Western, Eastern and Northeastern Basins with replenishment capacities of 362 mcm/ year, 172 mcm/year and 145 mcm/year respectively, Figure 2. Each basin comprises of multi layer aquifer system of various age and depth. The main composition of the aquifers is the carbonate rocks, which are generally fractured and karstified. In the mean time the aquifer in Gaza is mainly composed of sandstone, CDM/Morganti (1997).

In relation to surface water, the only surface water resource is the Jordan River. El-Musa (1996) reported that the exploitable water quantity from the River system is estimated at 1.3 billion m<sup>3</sup>/year. However, almost all the yield is exploited upstream. Currently, the flow in the lower part of the river that reaches the Dead Sea is of poor quality and doesn't exceed 100 mcm/year, Rabi (1997). In the mean time Palestinians believe that their share in the river is nearly 200 mcm/year, Elmusa (1996), though this share is still under negotiations with Israel.

The total annual groundwater abstraction in the West Bank is nearly 110 MCM CDM/Morganti (1997). While average annual discharge from fresh water springs varies from 50 – 55 mcm/year. Moreover, the coastal aquifer of Gaza is being over-exploited. Total abstraction by the 2000 registered Palestinian wells in Gaza is nearly 72MCM/year. While, the total abstraction by the 26 wells controlled by the Israeli Company is nearly 6MCM/ year, MOPIC (1996).

These figures indicate that groundwater storage in Gaza is depleted. This depletion caused seawater intrusion thus led to groundwater quality deterioration. Most of the wells in the middle and southern parts of the Gaza Strip have become brackish. The salinity of most of the wells in the south is greater than 2,500 ppm, and in some areas reach up to 7,000ppm (PHG, 1994). The Ministry of Planning and International Cooperation (MOPIC) (1996), concluded that 55 percent of the water produced lies within the poor quality category defined by WHO, 38 percent is deteriorated and only 7 percent is potable quality ( $Cl^- < 250\text{mg/l}$  &  $NO_3^- < 50\text{ mg/l}$ ).

Groundwater quality in the West Bank varies from one place to another in accordance with the abstraction depth and the human activities mainly at the recharge areas. The quality from all wells in the West Bank vary from "hard" to "very hard" water categories. The chemical composition of water from the majority of the wells fits the WHO standards and qualifies them as good for domestic uses. However, there are many wells show bacterial contamination, mainly Fecal Coliform, which restrict their use for domestic purposes. In addition, most of the wells are suitable for irrigation purposes, based on the sodium absorption ratio (SAR) and soluble sodium percentage (SSP), Abdul-Jaber et al., (1999)

Moreover, large number of springs in the West Bank have shown high concentration of nitrates and Fecal Coliform bacteria which restrict their use for domestic purposes, Abed Rabbo et al., (1999). This pollution is probably the result of contamination by seepage from the non-proper containment and treatment of wastewater and/or leachate from dumpsites.

The magnitude of potentially available water from the different non-conventional resources was estimated differently in the literature. However, the estimated treated wastewater quantities are nearly 16 million cubic meter per year (Mcm/year), MOPIC (1998), the potential surface runoff is nearly 45 Mcm/year and the brackish water mainly from springs is estimated at nearly 50 Mcm/year, Guttman (1995).

### **WATER USE PATTERNS**

Total water use in the West Bank and Gaza is estimated at nearly 250 Mcm/year. Agriculture uses almost 70% of this total and the remaining 30% are being used for domestic uses, which also include the commercial and industrial use. It is estimated that industry uses 30% of the domestic water use, CDM/Morganti (1997).

Despite the Fact that agriculture is the major water user in the West Bank and Gaza, it is one of the main constituents of the Palestinian economy. It contributes by nearly 30% to the GNP and employs nearly 33% of the total labor force in the West Bank and Gaza, El-Musa (1997), Rabi (1999).

However, it is important to state that the current water use figures doesn't comply with the actual demand due to the limitations imposed on the supply capacity to the Palestinians. The current levels merely reflect a suppressed type of water demand, CDM/Morganti (1997).

## POPULATION: GROWTH AND DENSITY

The total population in the West Bank and Gaza is estimated at approximately 1.7 and 1.05 million inhabitants respectively. The nature of population is young almost 80% of the population is below 35 years old (PWA 98).

The natural growth rate estimated at 3.8% for the West Bank and 4.26% for Gaza Strip. However it is believed that the natural growth rate might decrease in the coming years. It might be 2.02% and 2.49% for the West Bank and Gaza Strip, respectively in the year 2025, PCBS (1997).

Gross population density (i.e., total population divided by the total land area) is estimated at 280 persons/km<sup>2</sup> and 2638 persons/km<sup>2</sup> while the net average population density (i.e., total population divided by the total built-up land area) is estimated at 6,747 persons/km<sup>2</sup> and 12,000 persons/km<sup>2</sup> in the West Bank and Gaza respectively.

## LAND USE PATTERNS AND POLLUTION THREATS

The current land use patterns in the West Bank and Gaza can be shown in Table 1.

TABLE 1: Land uses categories in the West Bank and Gaza.

Category	West Bank (km <sup>2</sup> )	%	Gaza (km <sup>2</sup> )	%
Agriculture	1783	32	179	49
Irrigated (Palestinian)	100		100	
Irrigated (Israeli Settlements)	40			
Built up Areas – Public Infrastructure	334	6	69.7	19
Israeli Settlement – Built Up areas <sup>1</sup>	90	1.6	6.2	1.6
Forests, Pastures and Grazing land	1700	30.4	8	2
Unusable Land	1667	30	104	28.4

Source: Modified from PWA (1998).

<sup>1</sup> Information gathered from PALGRIC (1995) and Foundation for Middle East Peace (2000).

The fact that urban land use pattern forms small percentage, its related infrastructure and hence resulted human produce have significant impact on water and environment. The produced solid and liquid wastes are major threats to the water resources if not properly contained and treated. The current situation in the West Bank and Gaza shows that only 60% of the urban areas are connected to wastewater collection system but none of them has proper treatment system, MOPIC (1998). The issue is more acute in the case of not properly treated industrial effluent, mainly from the Israeli Settlements. In addition, there are no proper solid waste handling and disposing practices. Solid waste dumps are not considered sanitary and engineered dumping sites in the West Bank. The leachate from these dumps causing slow but irreversible damage to water resources, World Bank (1999).

The same also applies for irrigated agriculture in relation with its percentage of the total land use and the impact of its related activities on water resources. The overuse of freshwater quantities and the overuse of agrochemical materials are seriously affecting water resource sustainability.

## MANAGEMENT OF UNCERTAINTIES

The most significant type of uncertainties in a semi arid area such as the West Bank and Gaza is the drought. The impact of drought on water resources is very significant since rainfall is the only source of replenishment. Severe droughts occurred in the year 1998/99 have adversely effected water resources. Average rainfall during this year was nearly 30% of the long-term average of 60 years of record. This significant reduction in potential rainfall for replenishment was not coupled with proper water management decisions. Groundwater exploitation continued at almost the same rates, which resulted in groundwater storage depletion and salinity increase in the aquifers. Western groundwater basin, which Palestinian have no control over it was overexploited by nearly 290 Mcm. If this overexploitation continues the water quality of the basin will be seriously effected especially because the drought has no uniform return period and has no fixed frequency and duration over time in West Bank and Gaza, and in Israel, Bachmat & Khaled (2000).

This implies that water management strategies have to be dynamic. It has to consider the occurrence of droughts and rainfall deficiency. Consequently, pumping rates must not exceed replenishment rates at each given year.

## WATER INSTITUTIONS AND MANAGEMENT

For the past 3 decades water management in the West Bank and Gaza was constrained by several political, technical and economic factors. Such constraints have adversely effected the overall performance of the water sector and resulted in creating a large gap between the services provided and the demanded ones. The lack of investments in improving infrastructure (physical water losses reach 50% in some areas), the scattered nature of the water supply and management utilities with the absence of adequate rules and regulations and absence of stakeholder participation has resulted in the deterioration of the entire water system.

In addition, no adequate pricing policy exists. Willingness to pay and affordability is no considered. Cost recovery is not attained in several water supply utilities. Salih (1998) reported that only one utility in the West Bank attains cost recovery while the rest doesn't. This situation has led to substantial water price difference from one locality to another. The average price per cubic meter ( $m^3$ ) is estimated at 0.6\$/  $m^3$ . However, it may reach nearly 3\$/  $m^3$  in some localities where no proper water supply system exist. Water Obtained by Tankers may cost 5-6 \$/  $m^3$  in the areas lacking water supply services (40% of localities) in the same time the quality is much lower.

In the light of this alarming situation the challenge remains on the trade off decisions that should be made to insure the fulfillment of the IWRM requirements.

## DISCUSSION

The complex hydro-political situation in the JRB, which is characterized by natural water resources scarcity, conflicting demands as well as shared water resources, have increased the potential conflicts over the control and use of the resources among the riparian countries in one hand and among various sectors within each country on the other hand. Furthermore, the intensive development and use of these resources took place over the past five decades have altered both their quantity and quality. Salinity have shown some gradual increase annually in the western groundwater basin by magnitude of 1.5 mg/l  $Cl^-$ , and groundwater level dropped by several meters of magnitude in some aquifers, Israeli Ministry of Environment (1998), Bachmat & Khalid (2000).

In addition the none availability of final water agreements defining the exact shares, roles and responsibilities of each riparian in the JRB, especially the Palestinians, coupled with the lack of water laws, regulations and plans to manage uncertainties are complicating the IWRM issue in the West Bank and Gaza.

The expected growth and the young nature of the population implies increase in fresh water requirements and increase in liquid and solid waste production. It also implies urban expansion. Such

implications are likely to be met by the limited environmental resources (mainly land and water) in the West Bank and Gaza. This limits the ecosystem services provided to fresh water bodies and leads to water quality deterioration. It also causes removal of vegetation, loss of biodiversity, soil erosion and downstream flooding, Ferguson (1996).

Apparently, the application of some principles of IWRM in the West Bank and Gaza are faced with some major constraints. The most important one is resource availability, which may not exceed 293 m<sup>3</sup>/c/y. As such, reliable scenarios need to be defined to develop / adopt adequate per capita water use limits for all sectors. Developing an adequate per capita domestic water use limit may benefit from the work of Falkenmark (1993), Gleik (1996) and Shuval (1998) with some additional specific assumptions related to social set up, the water use practice of the Palestinian Society and water conservation means. Some useful assumptions related to the water use practice and water conservation technology is shown in Table 2.

TABLE 2: Comparison between conventional and improved appliances in the domestic water use.

Item	Conventional Liter	Improved Liter	Use Frequency	Daily water requirements	
				Conv. L/c/d	Improved L/c/d
Toilet Flush	10 - 12 ltr/flush	(0.5) 5 l/flush (1) 8 l/flush	4 times /day 1 time /day	50-60	20 8
Shower Head	10 l/m at full capacity	7.5 -5 l/min	summer 1 time (5 min/d) Winter 0.5 time (5 min/d)	50 25	25-37.5 12.5-18.75
Washing Machine	Full Automatic 131-200 l/wash	40-60 l/wash	5 times /month family of 5	4.4-6.7	1.33-2
Total				80.5- 105.5	45.5 - 60.3

Source: Modified from NRC (99).

Notes: m: minute; d: day; l, liter

The table shows that water needed to maintain an acceptable quality of life in a modern and moderately developing country is a function of water use practice and technology given that sufficient water quantities are provided. It is apparent that the 53 l/c/d (the average of 45.5 - 60.3 l/c/d (winter -Summer)) provides the household with the same functions provided by the 93 l/c/d. The only difference probably is that some portion of the 93 l/c/d is wasted. Most likely in draining toilets. Therefore, two possible scenarios for domestic per capita water use may be suggested as follows:

#### 1. Optimistic Scenario

Basic domestic water needs = {53 l/c/d} + { 13 l/c/d proposed by Glielk (96), as the basic human water need for drinking and for food preparation} + { $\alpha$ }.

#### 2. Realistic Scenario

Basic domestic water needs = {93 l/c/d} – {27 l/c/d the difference of water wasted in toilets} + {13 l/c/d proposed by Glielk (96), as the basic human water need for drinking and for food preparation} + { $\alpha$ }.

$\alpha$ : A constant may vary from 20 – 25 l/c/d to account for other household supplements in rural and semi urban areas in the West Bank and Gaza.

This may lead us to the conclusion that an adequate per capita domestic water use may vary from 88.5 – 101.5 l/c/d or an average of 95 l/c/d that means domestic water needs are nearly 95.35 Mm/year.

Given that average population growth rate is nearly 4% domestic water need will be tripled during the coming two decades. This indicates that water need to be reallocated from other sectors, mainly from agriculture. However, agriculture can be compensated by the treated wastewater produced by the domestic sector with keeping some fresh water quantities for the production of fresh food. In addition other commercial and industrial needs can also be met after satisfying the domestic basic needs because the former is a "want" and the later is a "a basic need" as pointed out by Gleik (1996). The water needed to maintain ecosystem services however is difficult to quantify in the case of an arid area like West Bank and Gaza. One

of the major impacts from over using groundwater is lowering the spring discharge thence effecting the stream habitats depending on such ecosystem, NRC (1999). Another requirement is improving the water quality of the lower part of the Jordan River and insuring adequate flow rate to sustain in-stream habitat and maintain the water level in the Dead Sea within acceptable range.

## RECOMMENDATIONS

Water management in the West Bank and Gaza must be based on the annual replenishment rates, taking into consideration the uncertainties. Efficient institutional setting need to be developed and major steps needs to be taken to involve various stake holders in the decision making. Proper willingness to pay and affordability issues need to be encountered in the pricing policy in order to avoid social discrepancies and to enable the poor and limited income people from getting their basic water need. Yet, full cost recovery needs to be attained. The role of women in water management is not properly reflected in the current setting therefore, more roles to them need to be devoted.

Major infrastructure rehabilitation and development is still needed to contain the escalating needs of growing population.

Urban development must comply with the land use plans and other resource protection plans (if exist). It also must be accompanied with adequate infrastructure to handle both liquid and solid waste properly. In this regard, Excessive development and pressure on the infrastructure of the urban centers need to be reduced through limiting the internal migration. Basic services need to be provided to rural areas so that people can stay there.

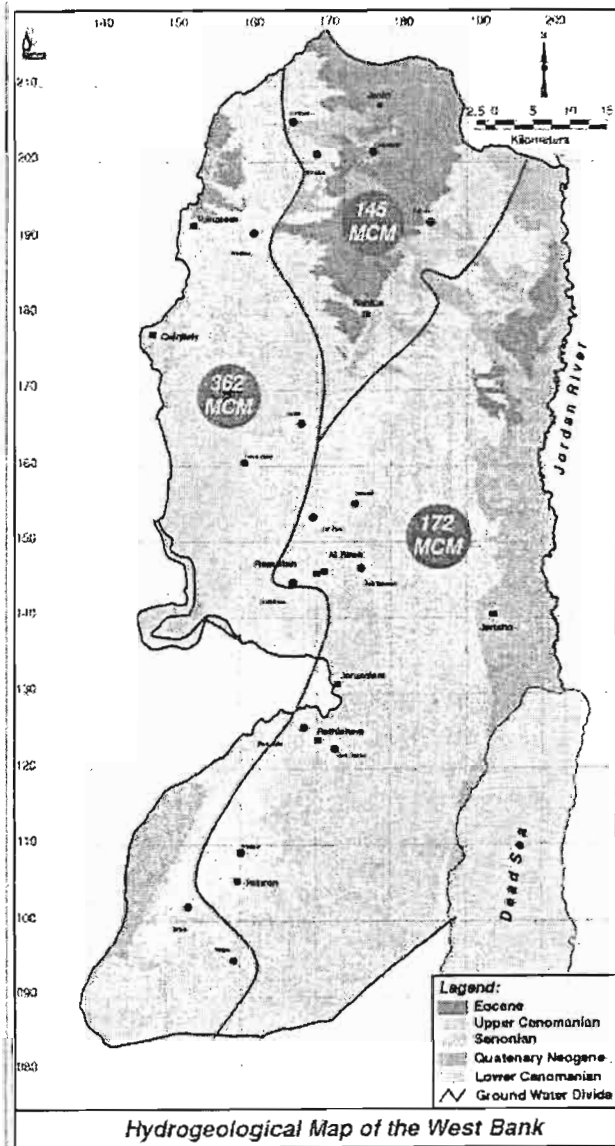
Proper regulations are needed to regulate the land use issues. Recharge areas need to be protected and kept free of any polluting activity.

Public awareness at national level must be launched to insure water conservation and protection of scarce water resources.

## REFERENCE

- ABED RABBO, A., SCARPA, D., QANNAM, Z., ABDEL JABER, Q., and YOUNGER P., 1999, Springs in The West Bank – Water Quality and Chemistry, Bethlehem University, PHG and UNUT, Jerusalem.
- ABDUL-JABER, Q., ABED RABBO, A., SCARPA, D., QANNAM, Z., and YOUNGER P., 1999, Wells The West Bank – Water Quality and Chemistry, Bethlehem University, PHG and UNUT, Jerusalem.
- CDM / Morganti, 1997, Comprehensive Planning Framework for Palestinian Water Resources Development – Final, Palestinian Water Authority, Ramallah.
- ELMUSA, S., 1996, "Negotiating Water: Israel and the Palestinians", Institute of Palestine Studies, Washington D.C.
- EL-MUSA, S., 1997, "Water Conflict-Economics, Politics, Law and Palestinian-Israeli Water Resources", Institute for Palestine studies, Washington, D.C.
- FALKENMARK M., and LINDH, G., 1993, Water and Economic Development, cited in Water in Crises – A Guid to the World's Fresh Water Resources ", Oxford University Press, Oxfod.
- Foundation for Middle East Peace, 2000, Settlement news Report, Vol. 10, No. 3, Washington DC., USA.
- GLEIK. P.H., 1996, "Basic Water Requirements for Human Activities : Meeting Basic Needs" , Pacific Institute for studies in Development, Environment and Security California.
- GUTMAN, Y. and ZUKERMAN, Ch., 1995, "A Model of the Flow in the Eastern Basin of the Mountains of Judea and Samaria from the Fariah stream to the Judean Desert". Water planning for Israel Tel Aviv.
- MOPIC, 1998, "Regional Plan for the West Bank Governorates - Water and Waste Water Existing Situation", 1'st Edition, Ministry of Planning and international Cooperation, West Bank.
- MOPIC, 1998, "Sensitive Water Resources Recharge Areas in the West Bank Governorates", Emergency Natural Resources Protection Plan, Ministry of Planning and International Cooperation, 2'nd Edition, West Bank.
- National Research Council, US. National Academy of Science, Royal Scientific Society of Jordan, Israel Academy of Sciences and Humanities and Palestinian Academy of Scienc, 1999, "Water for Future- the West Bank and Gaza, Israel, and Jordan", U.S. National Academy Press, Washington, D.C.
- Palestinian Central Bureau of Statistics (PCBS), 1997, "Population Census Results" Preliminary Report, Ramallah.
- Palestinian Geographic Center – Ministry of Transport, 1995, Built Up Areas in the West Bank, Ramallah, Palestine.
- Palestinian water Authority (PWA), 1998, "Water Sector in Palestine - Summary of Basic Information", Ramallah.
- RABI, A., 1997, "Environmental Conditions in Palestine: Major Area for Private Sector to Invest, Rehabilitate and Develop", Leibzeg, Germany.

- RABI, A., 1999, "Optimum Intersectoral Water Allocation in the West Bank", PhD Theses submitted to Washington International University, Pennsylvania - USA.
- SHUVAL, H., 1998, "A Re-evaluation of Some Misconceptions on Food and Water Security For Arid Countries in the Middle East". Paper submitted to conference on "Water and Food security in the Middle East, Necosia, April 20-23, 1998, Institute on Global conflict and cooperation, University of California, San Diego.





# IMPACT DES AMENAGEMENTS SUR LA RESSOURCE EN EAU DANS LE BASSIN DU MERGUELLIL (TUNISIE)

Dridi B.\*, Bourges J.\*\*\*, Auzet A. V.\*, Collinet J.\*\*\*, Kallel R.\*\*\*, Garreta Ph.\*

\* CEREG, UMR 7007 CNRS-ULP-ENGES, Strasbourg

\*\* Mission IRD B P 434, 1004 – El Menzah (Tunisie)

\*\*\* Direction Générale des Ressources en Eaux (DGRE), 43 rue de la Manoubia, Tunis)

## RESUME

En milieu semi aride, la question de la ressource en eau est cruciale. Les précipitations sont faibles et irrégulières, l'évaporation est forte et les nappes souterraines sont souvent surexploitées. L'irrégularité des précipitations se répercute sur le régime de l'écoulement alimenté à plus de 80 % par des crues souvent violentes. La Tunisie développe, depuis quelques dizaines d'années, des programmes dont les objectifs sont : (i) la mobilisation et l'utilisation optimale des eaux de surface, (ii) la lutte contre l'érosion (conservation des sols et limitation de l'envasement des retenues)

Dans ce contexte, les aménagements des versants et des cours d'eau ont été largement développés depuis plusieurs décennies avec leurs conséquences sur les apports aux zones aval. Le travail présenté ici propose une méthode et expose les résultats obtenus sur un bassin moyen ( $\approx 1200 \text{ km}^2$ ), le bassin de l'oued Merguellil, situé en Tunisie centrale. Il évalue la capacité de rétention des différents types de banquettes recensées dans ce bassin principalement en fonction de leur vétusté et de la pente du terrain ; il analyse l'efficacité de ces ouvrages, mis en place pour certains depuis plus de trente ans, sur l'interception du ruissellement en fonction des précipitations et de l'occupation du sol et aborde les conditions de leur destruction.

## INTRODUCTION

La Tunisie est un pays en grande partie semi-aride dont les potentialités hydrauliques constituent un facteur limitant au développement économique. Confronté actuellement à la dégradation continue d'une partie de ses ressources naturelles, l'Etat pose le problème de l'eau en termes nouveaux, ceux d'une politique d'investissements lourds pour la mobilisation de toutes les ressources disponibles (CES, 1992). Mais les ressources potentielles restant limitées par la nature, il importe de mettre l'accent sur les méthodes et les techniques qui peuvent assurer une valorisation optimale des ressources disponibles ainsi que sur la mise au point de techniques susceptibles de générer des économies d'eau.

Parmi les aménagements les banquettes à rétention totale constituent l'une des réponses les mieux adaptées au climat semi-aride qui permette de faire face au déficit pluviométrique et d'améliorer les réserves en eau de surface. Dans le bassin versant du Merguellil les banquettes sont réparties de façon inégale : elles sont rares à l'amont et concentrées dans les parties à relief plus modéré, au centre et à l'aval du bassin. Dans le but de disposer d'une ressource en eau plus ou moins pérenne dans un milieu frappé par la rareté des précipitations, l'Etat a adopté aussi une politique de lacs collinaires qui a pour effet secondaire de retenir un maximum de sédiments et lutter contre l'envasement des grands barrages.

Le but de ce travail est d'étudier l'efficacité des banquettes dans la rétention de l'eau en comparant leur capacité hydraulique aux apports par ruissellement de l'impluvium amont. Ces apports ont été évalués à partir de mesures d'aptitude au ruissellement des différentes unités d'espaces en fonction des types de sols, de leurs états de surface et sur la base d'une analyse des caractéristiques des pluies sur le bassin.

Le bassin choisi comme zone d'étude peut être considéré comme représentatif de la Tunisie centrale ; il dispose d'un bon suivi hydrologique et a bénéficié de plusieurs expériences d'aménagement au cours des dernières décennies.

D'une superficie de  $1170 \text{ km}^2$ , ce bassin est caractérisé par un relief peu accidenté : la topographie présente une large gamme de pentes. Les terrains pratiquement plats ( $0-5^\circ$ ) situés dans le centre sont largement prédominants, représentant près de 80 % de la superficie. Dans ce bassin, les conditions édaphiques défavorables, l'agressivité du climat, la forte pression démographique sur le milieu rural, la surexploitation des parcours et les pratiques culturelles inappropriées ont fait que la zone d'étude est l'une des plus affectées par l'érosion hydrique de cette région.

La pluviométrie annuelle oscille entre 200 et 500 mm avec une moyenne annuelle de 306 mm sur la période de référence 1970/97. Dans l'année, les mois les plus pluvieux sont septembre, octobre et mars. Les orages peuvent survenir à n'importe quel moment de l'année mais les averses les plus violentes et

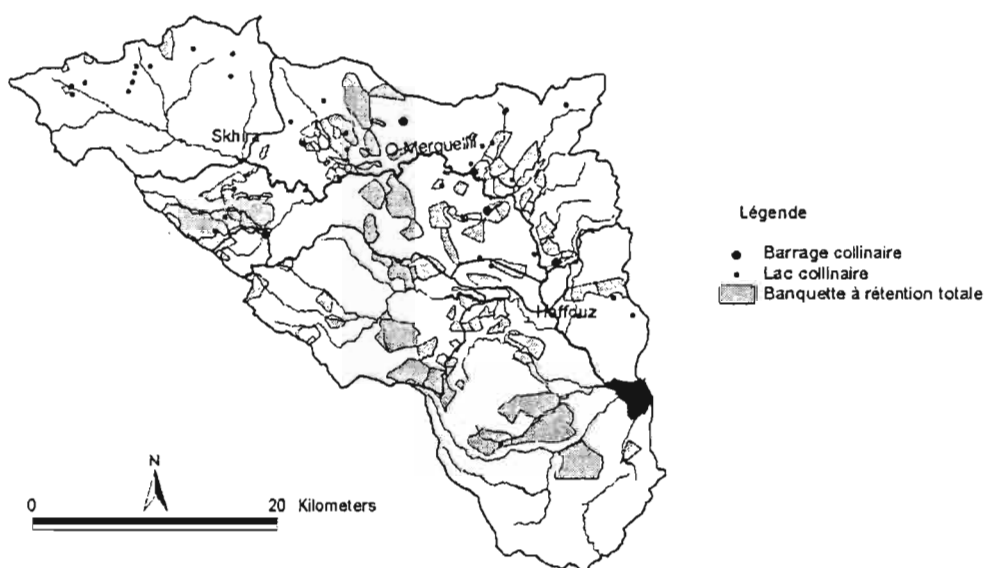


dangereuses pour les sols se produisent en fin d'été ou début d'automne. Par suite de l'irrégularité des pluies, le régime hydrologique est extrêmement variable d'une année à l'autre. Les crues contribuent pour 80 % à l'écoulement annuel. Elles apparaissent plus fréquemment en fin d'été-début d'automne (août, septembre, octobre). La lame ruisselée moyenne annuelle est de l'ordre de 25 mm à 30 mm.

## LES AMENAGEMENTS

Les banquettes à rétention totale sont des levées de terre aménagées dressées suivant les courbes de niveau, ayant pour objectif de stocker les eaux de ruissellement et de faciliter leur infiltration ; elles contribuent de cette manière à augmenter les réserves en eau du sol et à protéger les retenues contre un envasement rapide (Achour et Viertman, 1984, CES et al., 1995).

La carte des aménagements de conservation des eaux et des sols( CES) dressée en 1995 par les services techniques a été complétée et actualisée par des levés de terrain. La localisation et la délimitation des 112 sites aménagés en banquettes à rétention totale sur le bassin a été effectuée avec un GPS et introduite dans une base de données sous SIG. Depuis 1970 les superficies aménagées en banquettes ont fortement augmenté passant de 16 km<sup>2</sup> à 196 km<sup>2</sup> en 1998 (tableau 1) dont 70 % se trouve dans les sous bassins de Haffouz et Zebbes et seulement 2 %, en amont, dans le sous bassin de Skhira principalement occupé par la forêt (figure 1).



*Fig 1 : Situation des zones aménagées en banquettes et des retenues collinaires dans le bassin du Merguellil*

TABLEAU 1 : Surfaces aménagées en banquettes à rétention totale sur le bassin du Merguellil, de 1970 à 1998

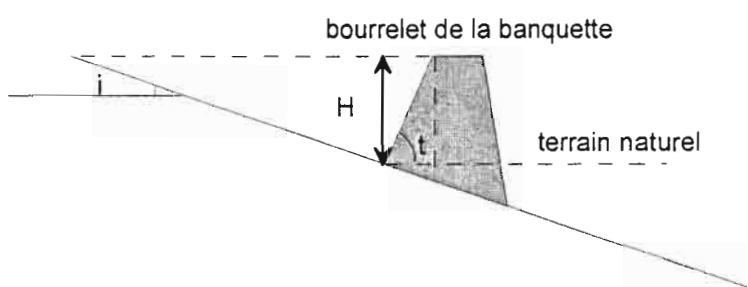
Années	Surfaces aménagées (ha)
1970	1600
1980	2310
1990	9743
1998	19600

Aux aménagements extensifs que représentent les banquettes viennent s'ajouter des aménagements ponctuels que sont les retenues collinaires pour lesquelles on distingue, en Tunisie, les lacs et les barrages, les premiers étant plus petits tant par la dimension de l'ouvrage que par la capacité de la retenue. Sur le bassin ont été recensés en 1998 38 lacs collinaires et 5 barrages collinaires.

## CAPACITE HYDRAULIQUE DES BANQUETTES

La capacité de stockage "géométrique" des cordons de banquettes dépend de leurs dimensions et de la topographie, facteurs qui sont variables d'un aménagement à l'autre en fonction du site, de l'ancienneté de l'ouvrage ou de son entretien, du type de banquette, manuelle ou mécanique, etc... Il est certain que le volume réel d'eau que peut retenir une banquette est supérieur au volume géométrique de sa retenue puisque dans la réalité, à moins d'une averse extrêmement brève et intense, l'eau s'infiltre progressivement libérant ainsi un volume supplémentaire pour les apports ultérieurs. Le volume géométrique qui est évalué ci-après est donc un volume par défaut, favorable à la sécurité. Pour définir la géométrie des banquettes et évaluer correctement leurs capacités hydrauliques, nous avons relevé sur le terrain, lors d'un inventaire détaillé, les caractéristiques suivantes :

- *données relatives à la banquette* : dimensions (hauteur mesurée à l'amont, du pied de la banquette jusqu'à la crête du talus), distance interbanquette mesurée entre l'aval d'une banquette et l'amont de la banquette suivante, état d'entretien, ancienneté (année de construction),
- *données relatives au milieu* : pente du terrain naturel, type de sol et épaisseur, occupation de l'espace, forme d'érosion, densité de pierres en surface (pierrosité).



### Méthodologie

La capacité de stockage maximale d'une banquette est assimilable au volume d'un prisme limité par le terrain naturel et la banquette (fig 2).

Fig 2 : Profil en travers d'une banquette à rétention totale

La capacité de retenue par mètre linéaire, V, peut se calculer aisément par :

$$V = \frac{H^2}{2} \left( \frac{1}{\text{tgi}} + \frac{1}{\text{tgt}} \right)$$

H étant la hauteur mesurée en amont de la banquette, i la pente du terrain et t la pente du talus amont de la banquette

La mesure sur le terrain des distances entre banquettes permet de calculer le nombre de banquettes construites sur une surface donnée et d'en déduire la "densité" de banquettes exprimée en mètres linéaires par hectare (m.ha<sup>-1</sup>). Le volume stockable à l'hectare est le produit de cette densité par un V moyen sur la parcelle. Il est exprimé, pour faciliter la comparaison avec les précipitations, en lame équivalente (mm).

## Typologie des banquettes

Les dimensions des banquettes varient selon les sites de sorte qu'il y a pratiquement autant de capacités de stockage différentes que des sites. Etant donné l'importance des sites aménagés (112) nous les avons répartis par classes de hauteur de banquette et de pente sachant que la capacité de stockage dépend essentiellement de ces deux facteurs :

- **la pente du terrain naturel** : nous avons calculé pour chaque classe de pente la surface totale aménagée ainsi que le nombre de sites. La pente de 8 % est la plus fréquemment observée tant par la proportion des surface aménagée que du nombre de sites (figure 3). Les banquettes se trouvant sur des pentes supérieures à 15 % concernent 11 % de la superficie totale aménagée.

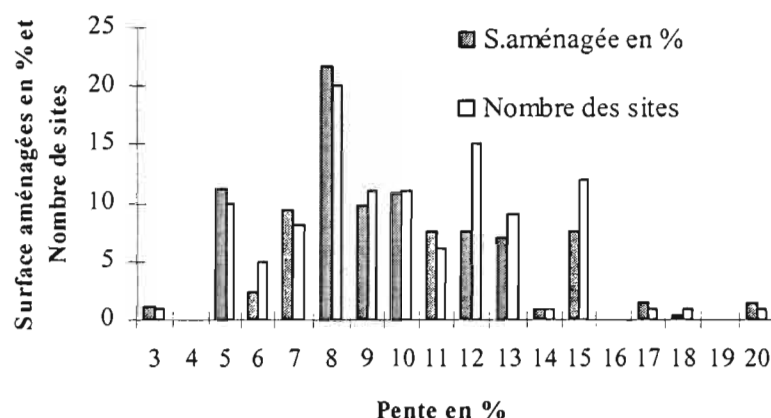


Fig 3 : Proportion de surface aménagée et nombre de sites sur le bassin du Merguellil en fonction de la pente

- **la hauteur de la banquette** : partant du principe que la hauteur se réduit avec le temps, nous les avons réparties en deux classes d'ancienneté avec un seuil flottant de 2 à 4 ans. (tableau 2) ; sur la totalité de l'échantillon, le seuil de 4 ans semble être le moins pertinent. Pour améliorer la discrimination et vérifier aussi qu'il n'y a pas d'influence de la pente, nous avons réparti dans chaque classe les aménagements selon les pentes supérieures ou non à 8 %. Bien que le différence ne soit pas très marquée, le seuil de 3 ans semble plus pertinent pour séparer aménagements récents et anciens et mettre ainsi en évidence l'influence de l'ancienneté sur la hauteur de crête. On remarque au passage que l'influence de la pente n'intervient guère sur la hauteur de ces aménagements.

Il est important de souligner que la hauteur prise en compte pour la détermination du volume de retenue par mètre linéaire de banquette est la hauteur mesurée sur le terrain diminuée d'une décote de 0,20 m pour tenir compte de l'irrégularité de la crête.

TABEAU 2 : Hauteurs moyennes des banquettes en fonction de leur ancienneté

Nbre de sites	Classes	H moy (m)	Surface (%)	Hmoy (m) p≤8%	Surface (%)	Hmoy (m) p> 8%	Surface (%)
24	≤ 2 ans	1,07	29	1,11	15	1,05	14
88	> 2 ans	0,88	71	0,87	31	0,89	40
<b>26</b>	<b>≤ 3 ans</b>	<b>1,05</b>	<b>30</b>	<b>1,04</b>	<b>16</b>	<b>1,05</b>	<b>14</b>
<b>86</b>	<b>&gt; 3ans</b>	<b>0,88</b>	<b>70</b>	<b>0,87</b>	<b>30</b>	<b>0,89</b>	<b>40</b>
44	≤ 4 ans	0,99	45	0,98	25	0,99	20
68	> 4 ans	0,88	55	0,86	21	0,90	34

Les capacités de stockage obtenues à partir de ces mesures sont comprises à 80% entre 60 et 140 mm avec une médiane de l'ordre de 85 mm. Elles diminuent généralement avec l'âge des ouvrages, mais semblent se stabiliser au bout d'une dizaine d'années particulièrement si les aménagements sont bien

entretenus. Dans le haut bassin la capacité de stockage varie de 70 à 150 mm mais peut atteindre jusqu'à 250 mm dans le bassin de Zebbes (figure 4).

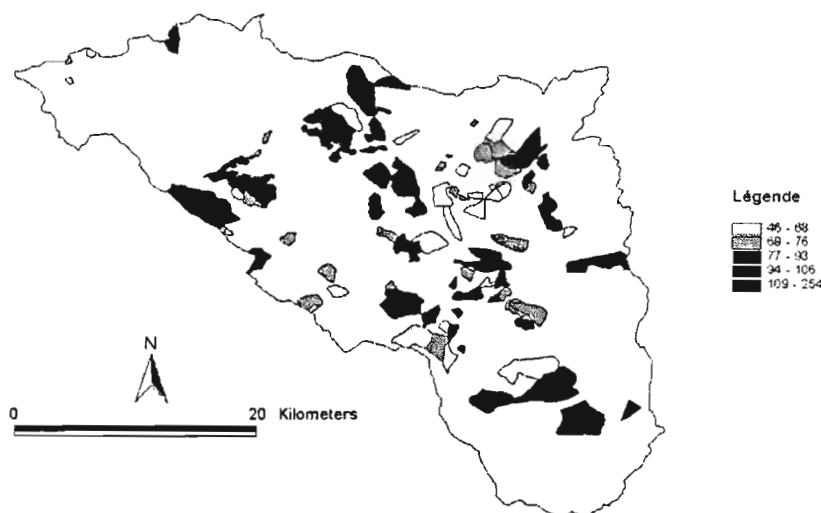


Fig 4 : Répartition des capacités de stockage des banquettes (mm) dans le bassin du Merguellil

Près de la moitié des sites aménagés sont situés sur des zones de culture dont la production bénéficie de cet apport d'eau supplémentaire. Comme nous l'avons déjà souligné il est bon de rappeler que les valeurs avancées précédemment sont des valeurs minimales, sous estimées, puisque la capacité réelle de rétention du système banquette-sol ne peut être que supérieure au volume géométrique de retenue de ces ouvrages.

## RUISSELLEMENT ET STOCKAGE

L'objectif est d'évaluer sur les périmètres aménagés les volumes de ruissellement pour les comparer aux capacités de stockage ce qui implique l'utilisation d'une méthode d'évaluation du ruissellement simple et applicable à grande échelle. Cette évaluation passe par la reconnaissance des états de surface qui est un outil permettant d'identifier les parties du bassin versant potentiellement aptes à ruisseler (Auzet et al., 1993). La reconnaissance des états de surface permet d'identifier aussi les surfaces « fermées » dont l'état structural limite l'infiltration vers les couches profondes. Ont été considérées comme « surfaces fermées » les croûtes, les pellicules de battance, les pellicules monocouches et multicouches, les cailloux inclus et les affleurements. La densité du couvert végétal a aussi été mesurée dans la mesure où elle freine et restreint le ruissellement.

Pour évaluer le ruissellement, nous avons procédé à des mesures directes de ruissellement au moyen de la simulation par aspersion manuelle qui utilise un irrigateur manuel à rampe modifié (Roose, 1995). Méthode facile à mettre en œuvre, elle fournit une bonne première approche du ruissellement bien qu'elle ne puisse être comparée au mini simulateur d'abord à cause de l'absence d'énergie cinétique des gouttes et donc d'effet mécanique sur le sol mais aussi de l'influence « humaine » due au tour de main de l'opérateur. L'intensité de la pluie est obtenue par obturation partielle d'une rampe qui est ainsi "étalonnée" pour fournir les intensités de l'ordre de 60 mm.h<sup>-1</sup>, 120 mm.h<sup>-1</sup> ou 240 mm.h<sup>-1</sup>.

Deux campagnes de mesures ont eu lieu sur 27 sites sélectionnés de façon à constituer un échantillon le plus représentatif possible des caractéristiques pédologiques, du couvert végétal, des états de surface et des types d'usage du sol rencontrés sur le bassin.

Nous avons démontré que la granulométrie, l'état hydrique initial et la pluie d'imbibition ne peuvent expliquer à eux seuls le ruissellement. Le sol ne joue pas uniquement le rôle d'un réservoir, mais constitue également un facteur déterminant dans le contrôle du ruissellement. Pour une intensité de 120 mm.h<sup>-1</sup> et pour

deux occupations du sol distinctes, jachère et parcours d'une part et labours d'autre part, nous avons obtenu une relation acceptable entre Kr et Sf selon le taux d'argile dans le sol.

- **Pour les jachères et parcours**

Nous constatons une dissociation des comportements du fait des textures : les textures fines, en particulier sur les sols argileux sur marnes gonflantes (présence de fissures) infiltrent mieux car elles ne ruissellent qu'au-delà de 45 % de Sf avec des Kr qui croissent très vite jusqu'à plus de 60% ; les textures grossières (sols limono-sableux sur calcaires gréseux) ruissellent dès 30 % de Sf mais avec des Kr qui montent moins vite et ne dépassent guère 40 %. Cette différence est liée à la stabilité structurale des surfaces, plus forte pour les textures fines, et relativement faible pour les textures grossières qui donnent rapidement des pellicules de battance.

- **Pour les labours**

Dans le cas des labours, la rugosité est élevée et les sols relativement profonds sont plus aérés (grande porosité). Sur les marnes et argilites, la fissuration permet une certaine infiltration, mais l'imperméabilité reste forte.

TABLEAU 3: Coefficients de ruissellement à la parcelle (%) pour différents états de sol

Texture/scénarios	Labour frais	Labour ayant subi une pluie	Labour ancien	Jachère + parcours
<b>Forêt sur marno calcaire</b>				32
<b>Argileux</b>	0	10	35	40
<b>Sable fin argileux</b>	2	25	35	30
<b>Sable grossier</b>	0	19	21	20
<b>Epandage de pierres</b>	25	30	35	55
<b>Affleurement rocheux, steppe d'alfa</b>				70

Etant donné la dispersion relative des points représentatifs ( $R^2 \neq 0,70$ ), probablement due à un échantillonnage trop restreint de sites et de phases culturelles, il est certain que ces valeurs ne doivent être considérées que comme une première approximation du coefficient de ruissellement, suffisante toutefois pour les besoins de cette étude.

Enfin on remarque que le tableau 3 met bien en évidence la variation au cours de l'année des coefficients de ruissellement en fonction des types de sol, des façons culturales ainsi que d'autres facteurs qui modifient les états de surface et notamment la proportion des surfaces fermées Sf.

L'objectif de cette étude n'est pas simplement d'évaluer le ruissellement mais d'évaluer la capacité des banquettes de CES à retenir ce ruissellement afin de mesurer leur influence sur l'écoulement à l'exutoire. Si tout le ruissellement produit peut être stocké, l'impact des banquettes est total. Si le ruissellement est supérieur à la capacité des banquettes, il peut y avoir destruction des ouvrages et risque de rupture en cascade. Compte tenu des valeurs des coefficients de ruissellement à la parcelle évalués précédemment qu'on estimera proche des Kr affectant l'espace inter banquettes sur les sites aménagés, on peut calculer pour chacun des périmètres le coefficient d'écoulement en fonction de l'occupation du sol, du type de sol (%Ag, Sf) et de la phase culturale le cas échéant.

L'application de ces divers coefficients aux précipitations susceptibles de ruisseler durant une année moyenne d'abord, puis une décennale humide, fournit une lame maximale de l'ordre de 70 mm donc inférieure à la capacité (sous estimée) des banquettes à rétention totale. Ainsi, sauf en cas de pluies exceptionnelles, le ruissellement produit sur les sites aménagés est inférieur à la capacité de stockage des ouvrages.

## IMPACT SUR L'ÉCOULEMENT

La capacité de rétention des zones aménagées en banquettes étant supérieure aux apports de leur impluvium, à condition bien entendu que les banquettes de terre soient construites selon les normes et bien entretenues, l'impact sur l'écoulement moyen peut être considéré comme proportionnel à la surface aménagée ; il varie de 2 % pour un sous bassin quasiment à l'état naturel comme celui de Skhira à 20 % pour celui de Zebbes (tableau 4).

TABLEAU 4 : Surface aménagée en banquettes par sous bassins

Nom du bassin	Surface des bassins (ha)	Surface aménagée (ha)	% surface aménagée	Capacité moyenne des banquettes (mm)	Nombre de sites
Skhira	19000	292	2	180	4
El Morra	1150	135	12	95	3
Zebbes	18000	3511	20	190	27
Haffouz	66700	10819	16	170	81
<b>El Haouareb</b>	<b>117300</b>	<b>19566</b>	<b>17</b>	<b>170</b>	<b>112</b>

Les retenues collinaires, lacs et barrages confondus, contrôlent une superficie totale de 158 km<sup>2</sup> avec une capacité initiale de 5,8 millions de m<sup>3</sup> soit une lame de 36 mm tout à fait comparable à l'apport annuel. Réparti sur l'ensemble du bassin de Haffouz (670 km<sup>2</sup>) le volume total initial des retenues représenterait une lame de 9 mm. Mais cette capacité est fortement affectée par l'érosion avec un taux d'envasement moyen des réservoirs de 4,6 %.an<sup>-1</sup> (Albergel et Rejeb, 1997). Ce "piégeage" des sédiments par les aménagements à l'amont du bassin réduit l'envasement des grands barrages situés à l'aval qui n'en reste pas moins conséquent puisqu'on évalue la perte de capacité pour le barrage d'El Haouareb à 2 % par an (Kingumbi, 1999). Il est certain qu'au fil du temps l'impact des retenues ira en s'amenuisant mais en l'état actuel du dispositif la plupart des bassins contrôlés par des retenues ne participent pas en année moyenne à l'écoulement.

Les apports parvenant au barrage d'El Haouareb proviennent donc essentiellement des 860 km<sup>2</sup> non aménagés du bassin, certains périmètres ayant été aménagés simultanément en banquettes et en retenue.

## CONCLUSION

L'impact global de ces divers aménagements, retenues et banquettes dans les conditions optimales de remplissage (conditions initiales) serait une réduction de près de 35 % de l'écoulement moyen sur un bassin comme celui de Haffouz, principalement sous l'effet des retenues et de 28% sur le bassin entier principalement à cause des banquettes

En 1998, compte tenu de la diminution de la capacité réelle des retenues due à leur envasement, l'impact sur l'ensemble du bassin du Merguellil peut être évalué à 25 % dont 17 % dus aux banquettes et 8 % aux retenues. Ce chiffre est à comparer au taux de réduction des apports moyens à l'exutoire du bassin entre deux périodes, climatiquement comparables, 1926/82 et 1989/99 qui est de 35 à 40 %.

Il est intéressant de noter que c'est au cours des années 80 que se sont produits les plus importants changements du milieu dus à l'anthropisation, aménagement mais aussi occupation du sol. Pour compléter cette analyse il serait donc utile d'étudier la dynamique de l'occupation du sol sur ce bassin au cours des dernières décennies afin de voir si elle ne serait pas le facteur réducteur de ruissellement complémentaire qui pourrait justifier cette baisse des apports.

## BIBLIOGRAPHIE

- ACHOUR M., VIERTMANN W., 1984 – Les aménagements anti-érosifs recommandés par le projet TU.81/14, leurs caractéristiques et les possibilités de leur application. Kairouan, 65 p.
- ALBERGEL J. et REJEB, 1997 – Communication à l'Académie des sciences
- AUZET A.V., BOIFFIN J., PAPPY F., LUDWING B., MAUCORP J., 1993- Rill erosion as a fonction of the characteristics of cultivated catchment in the north of France. Cetan. (20)(1/2), pp : 41-62
- CES., 1990 – Protection du barrage El Haouareb et alimentation de la nappe de Bouhafna. Tunis, 8 p.
- CES., 1992 – Etude d'un programme de développement agricole intégré dans la délégation de Oussléti, El Ala, Hajeb, Sbikha et Haffouz. Tunis, 92 p.
- CES., 1995 : Guide de conservation des eaux et des sols. Tunis, 273 p
- GHOLA H., 1993 – Gestion des lacs collinaires. Tunis, 105 p.
- ROOSE E, 1995 – Une nouvelle stratégie de lutte antiérosive en zone méditerranéenne. Paris, 146-178.



# PARAMETRISATION DU FONCTIONNEMENT D'UN KARST DANS UN MODELE GLOBAL : EXEMPLE DE LA VENE (HERAULT, FRANCE)

Tournoud M. G., Dezetter A., Salles C.

*Hydrosiences Montpellier  
UMR 5569 UM2 – CNRS – IRD  
Université de Montpellier 2  
Maison des Sciences de l'Eau – 34095 MONTPELLIER cedex 5*

- <sup>(1)</sup> *tel +33 (0)467.14.42.72  
email [tournoud@msem.univ-montp2.fr](mailto:tournoud@msem.univ-montp2.fr)*
- <sup>(2)</sup> *tel +33 (0)467.14.90.43  
email [Alain.Dezetter@msem.univ-montp2.fr](mailto:Alain.Dezetter@msem.univ-montp2.fr)*
- <sup>(3)</sup> *tel +33 (0)467.14.42.69  
email [salles@msem.univ-montp2.fr](mailto:salles@msem.univ-montp2.fr)*

## RESUME

La modélisation conceptuelle globale de la relation pluie débit, classiquement utilisée (dans les modèles de type GR par exemple) n'est pas directement adaptée à la prise en compte des apports liés à la présence d'un karst. Or de nombreux bassins versants méditerranéens comportent une composante karstique non négligeable, qui influence leur réponse hydrologique. C'est le cas de la Vène (Hérault, France), dont le bassin versant topographique d'une superficie de 70 km<sup>2</sup> est alimenté par deux sources karstiques. La modélisation hydrologique de ces bassins nécessite de compléter le modèle global classique par un module de fonctionnement du karst.

Cette démarche est présentée ici. Le modèle global de départ, inspiré du modèle GR3, est complété par différents "modules karst". Nous reportons ici une analyse des différentes paramétrisations des "modules karst" et leur application aux données observées sur la Vène, pour la période 1994-1999.

## INTRODUCTION

De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour l'évaluation des ressources en eau d'un bassin versant. Parmi celles-ci, la modélisation globale de la relation pluie-débit est largement utilisée (SINGH V.P., 1995) car elle est robuste et permet de reconstituer de longues séries de débits à partir de chroniques de pluie, souvent beaucoup plus longues. Pour les bassins versants méditerranéens, on se heurte à des difficultés relatives à la présence de zones karstiques venant alimenter les cours d'eau à partir d'impluvium se situant en dehors du bassin versant superficiel. Les modèles globaux classiques ont des difficultés à simuler le fonctionnement d'un karst, en grande partie à cause des discontinuités dans les écoulements engendrées par ce karst.

L'objet de ce travail est de tester différentes paramétrisations du fonctionnement d'un karst dans un modèle conceptuel global. Le modèle retenu est basé sur le modèle GR3 (Edijatno et Michel, 1989) auquel on adjoint différents modules destinés à modéliser les flux d'origine karstique. Les différents modules sont testés sur le bassin versant de la Vène pour la période 1994-1999. Leur comportement est examiné à la lumière du critère de Nash (1970).

## DESCRIPTION

La Vène prend sa source à une résurgence karstique dont l'alimentation est assurée par l'infiltration partielle des eaux dans les karsts du jurassique situés à l'extérieur du bassin versant topographique. Sur son trajet, une deuxième source karstique vient augmenter le débit de la Vène avant son rejet dans l'étang de Thau. Le bassin d'alimentation de la Vène comprend donc le bassin topographique, d'une superficie d'environ 70 km<sup>2</sup> ainsi qu'une partie des bassins voisins du Coulazou et du karst profond, soit une surface totale estimée de 140 km<sup>2</sup>. Le bassin versant topographique de la Vène est constituée pour l'essentiel de terrains calcaires



karstiques datant du secondaire ou du tertiaire. Morphologiquement, c'est un bassin à pente plutôt forte, en moyenne de l'ordre de 2 %.

Le suivi pluviométrique sur le bassin est assuré par deux pluviographes à augets basculeurs mesurant en continu la pluie avec une précision de 0.2 mm. Le pluviographe de Montbazin est installé sur la partie haute au Nord du bassin. Le pluviographe de la station météorologique de Mèze à proximité du bassin de la Vène renseigne sur les pluies à proximité de l'exutoire. La station débitmétrique située à Poussan fournit un suivi hydrométrique continu du bassin de période quinze minutes. (figure 1a).

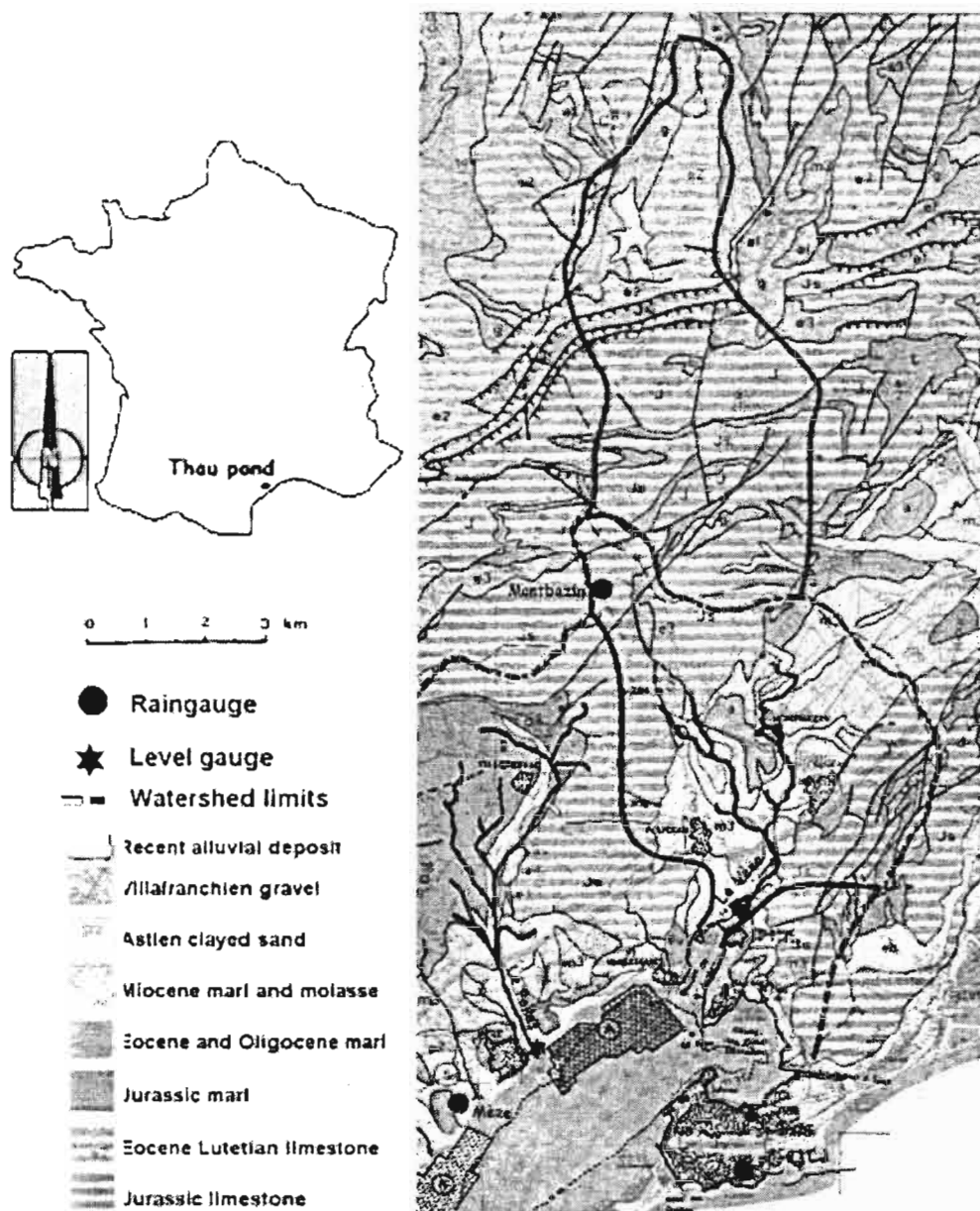


Figure 1a: Le bassin versant de la Vène.

Les données sont disponibles de septembre 1994 à août 1999. Du fait de l'interruption du fonctionnement des stations d'acquisition durant l'année 1996-97, on distingue deux périodes ; de septembre 1994 à juillet 1996 (P1) et d'août 1997 à septembre 1999 (P2), soit en tout quatre années hydrologiques. Les hyétogrammes et hydrogrammes sont reportés sur la figure 1b. Les deux périodes sont sensiblement différentes. La pluviométrie de la période P1 est 1.4 fois supérieure à celle observée pendant la période P2. Le rapport des lames écoulées (4.6) marque encore plus le contraste entre ces deux périodes. Le coefficient d'écoulement sur une base annuelle vaut 0.76 et 1.00, et 0.49 et 0.11 respectivement pour les années une et deux des deux périodes. Les fortes valeurs du coefficient d'écoulement pendant la période P1 mettent en évidence le surplus d'apport aux écoulements en provenance de la composante karstique. Au contraire le coefficient d'écoulement pendant P2 reste dans une gamme de valeurs couramment observées pour un bassin

versant naturel (Ven Te Chow, 1964). Durant cette période on peut considérer que les apports d'origine karstique sont probablement nuls ou quasi inexistant.

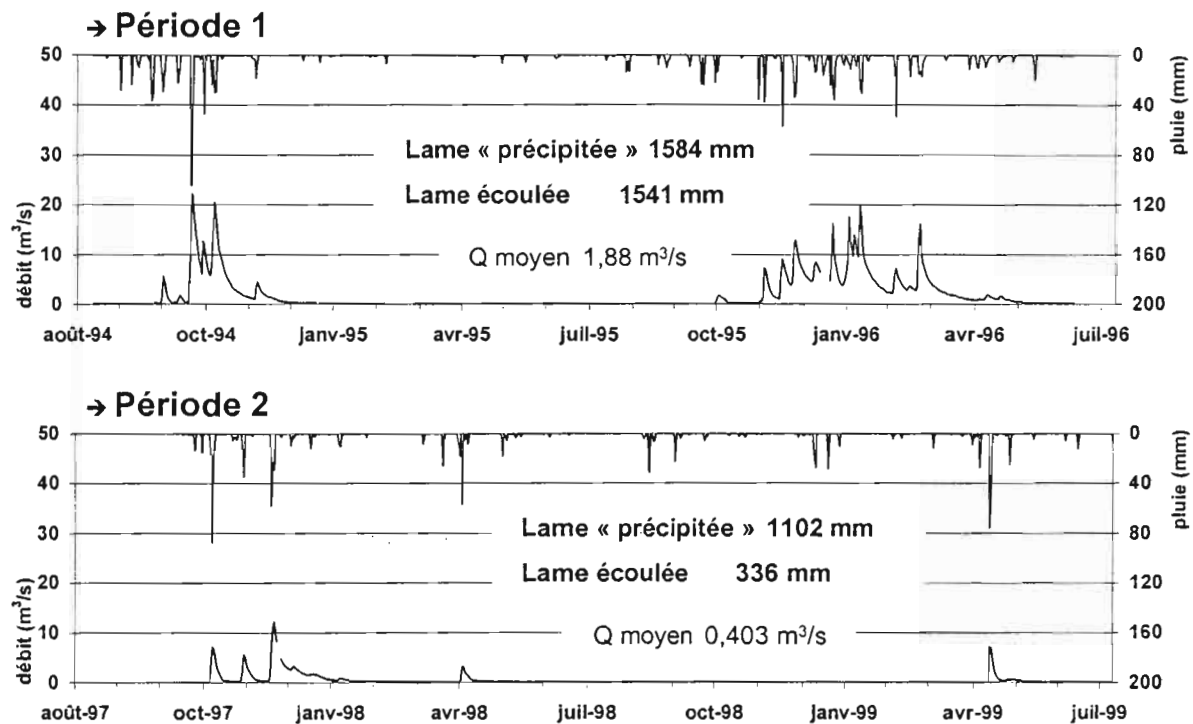


Fig. 1b: Les données hydrologiques

## MODELISATION

Le modèle retenu est basé sur le modèle global conceptuel GR3 original de Edijatno et Michel (1989). Le modèle a été réécrit sous l'architecture du logiciel Vensim. La formulation simplifiée des flux proposée par Najem et al. (2000) et Bocquillon (2000, communication personnelle) a été utilisée. Elle fait abstraction de l'hydrogramme unitaire simulant le transfert vers le réservoir eau gravitaire.

La base du modèle S-R ainsi constitué est la suivante. Elle est composé de deux réservoirs (figure 2a) :

- un réservoir sol (S), qui assure la production, caractérisé par sa capacité maximum ( $S_{max}$ )
- un réservoir de routage (R) caractérisé par sa capacité moyenne ( $R_{moy}$ ).

Fig. 2 : Schématisation des divers modèles testés

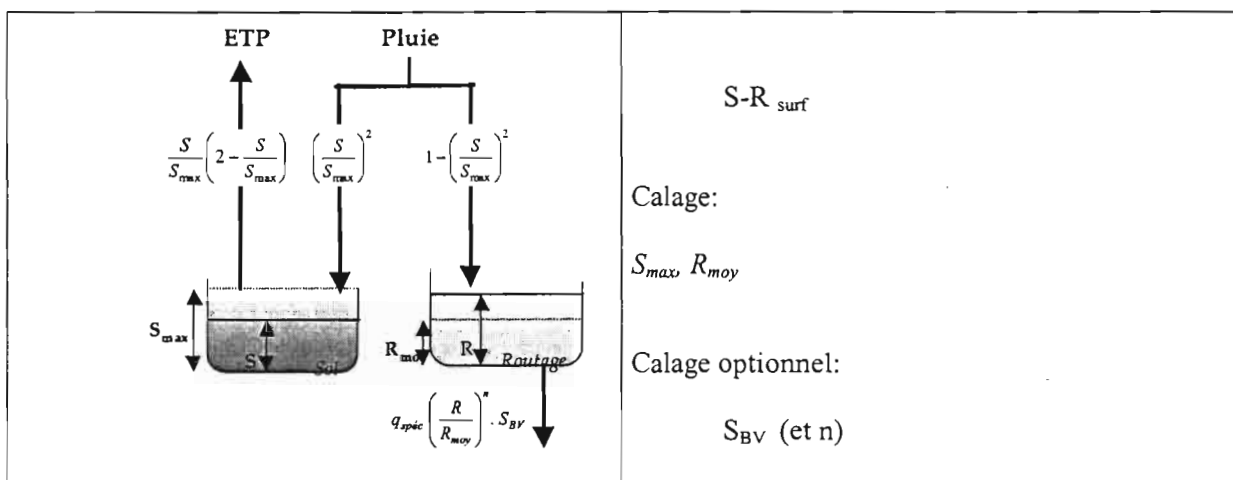


Fig. 2a : Le modèle S-R et la variante

Les fonctions et paramètres qui régissent le prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle et la loi de vidange du réservoir R restent identiques à celles utilisées pour les modèles GR déjà éprouvés. Le nombre de paramètres de calage du modèle S-R ainsi constitué est réduit à deux :  $S_{\max}$  et  $R_{\text{moy}}$ .

On a complété le modèle S-R par divers modules destinés à prendre en compte la nature du bassin de la Vène et à restituer les flux d'origine karstique. Une approche préliminaire considère que le fonctionnement du bassin d'alimentation du karst est similaire au bassin versant superficiel. L'introduction dans S-R d'un troisième paramètre de calage, la surface du bassin versant ( $S_{BV}$ ) sensé représenter la surface totale (i.e. bassin versant superficiel plus bassin d'alimentation du karst) constitue la première adaptation testée (S-R<sub>surf</sub>).

Par la suite deux orientations ont été suivies :

Une première approche dénommée S-RK conserve un modèle à deux réservoirs (figure 2b). Le réservoir sol est celui du modèle S-R. Le second réservoir (KR) est plus complexe. Il est représentatif des écoulements de surface et des écoulements d'origine karstique. Par rapport au réservoir R, une deuxième vidange qui entre en activité au delà du seuil ( $KR_{\text{seuil}}$ ) est ajoutée. Cette fonction supplémentaire est destinée à traduire la mise en charge et l'écoulement des sources karstiques.

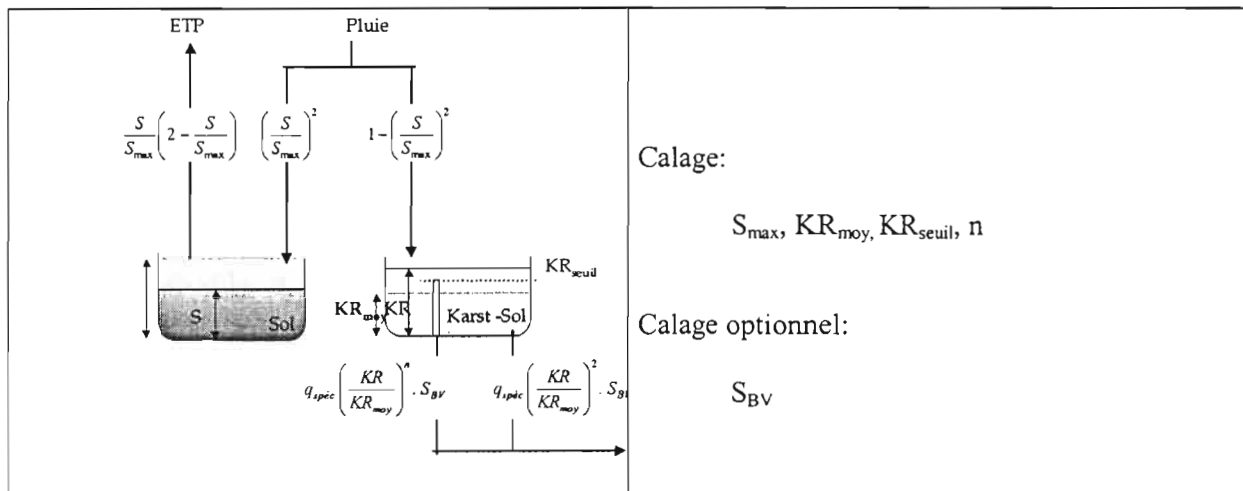


Fig. 2b : Le modèle S-RK

Dans une deuxième approche on ajoute au modèle S-R un réservoir dédié au bassin karstique. Cette modélisation à trois réservoirs sera identifiée par les initiales S-R-K. Dans un premier temps, on fait l'hypothèse que le réservoir K représentatif du karst fonctionne identiquement au réservoir R routage (figure 2c). Une variante (figure 2d) suppose une double vidange du réservoir K :

- une fuite qui n'est pas restituée au cours d'eau représentative des pertes par évaporation, pompage ou écoulement direct à la lagune.
- pour un niveau supérieur à  $K_{\text{seuil}}$ , le trop-plein alimente le débit du cours d'eau.

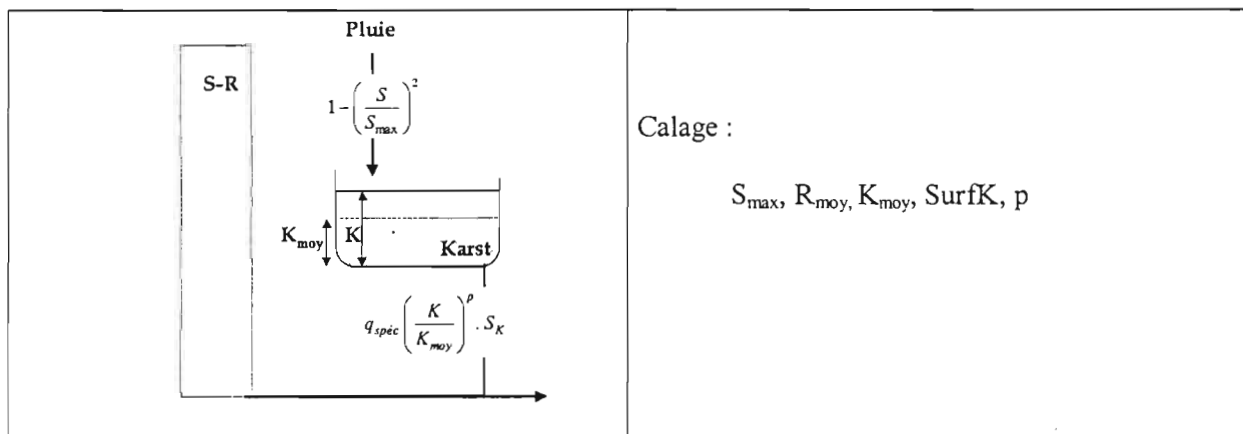


Figure 2c: Le modèle S-R-K

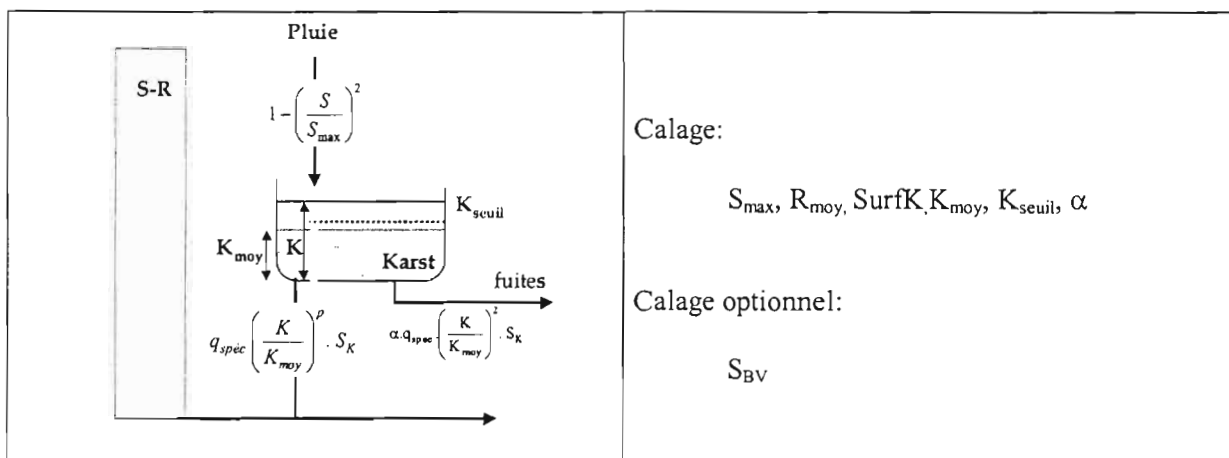


Figure 2d: Le modèle S-R-K avec fuites

Deux fonctions pour l'expression des fuites ont été testées : d'une part un débit de fuite dépendant du niveau de remplissage du réservoir karst et d'autre part un débit de fuite proportionnel au débit du bassin karstique.

Ces deux approches ont été menées avec des niveaux de complexité croissante en fonction du nombre de paramètres de calage des divers modèles. Un récapitulatif des diverses options testées et des paramètres de calage retenus est porté en regard des schémas des modèles. Le nombre de paramètres de calage évolue depuis 2 pour le modèle S-R basique à 6 pour le modèle S-R-K avec fuites.

#### 4. RESULTATS ET DISCUSSION

Les différentes formulations des modèles décrits précédemment ont été testées pour les deux échantillons pluie-débit disponibles. Le critère de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970) est retenu pour caractériser l'adéquation du modèle.

Le pas de temps adopté pour la modélisation est issu des valeurs du temps de concentration du bassin estimées à partir des diverses formulations disponibles dans la littérature (Chow, 1977) et des résultats du test de tous les modèles pour des pas de temps variant de 3 à 24 heures. En utilisant un pas de temps de 12 heures, le temps de concentration du bassin, estimé à environ 6 heures) est respecté et on obtient des jeux de paramètres correspondant aux meilleures valeurs du critère de qualité de l'ajustement des modèles.

L'état initial du modèle est un problème récurrent aux modèles à réservoir. Les tests réalisés sur le modèle de base S-R pour les deux périodes et sur une série fictive de plusieurs périodes consécutives identiques démontrent qu'en fin d'année hydrologique les réservoirs avoisinent un état égal ou proche de zéro. En conséquence, les valeurs initiales des réservoir S et R ont été fixées égales à zéro indépendamment de la période considérée. Le test d'initialisation des réservoirs mixtes karst-bassin superficiel ou des réservoirs dédiés au karst est impossible compte tenu de la courte durée des périodes de mesures et de leurs caractéristiques contrastées.

A l'issue de ces phases préparatoires, les paramètres conduisant à un optimum entre les débits observés et les débits modélisés sont calés sur chacune des deux périodes d'observations disponibles (tableau 1).

TABLEAU 1 : Récapitulatif des simulations réalisées

	nombre paramètres	Sol	Routage				Karst					critères de Nash	
		$S_{max}$	$R_{moy}$	n	$S_{BV}$	$K_{moy}$	SurfK	p	$K_{seuil}$	$\alpha$		période 1	période 2
						$KR_{moy}$			$KR_{seuil}$				
S-R	2	calé	calé	2	70							0,685	0,867
S-R <sub>surf</sub>	3	calé	calé	2	calé							0,810	0,895
S-R <sub>surf</sub> (bis)	4	calé	calé	calé	calé							0,822	0,905
S-RK	4	calé				calé	70	calé	calé			0,712	0,869
S-RK <sub>(bis)</sub>	5	calé			calé	calé		calé	calé			0,822	0,902
S-R-K	5	calé	calé	2	70	calé	calé	calé				0,691	0,877
S-R-K <sub>fuites</sub>	6	calé	calé	2	70	calé	calé	1.3	calé	calé		0,856	0,937

Quelque soit la période considérée, le modèle  $SR_{surf}$  où la surface du réservoir R est un paramètre du modèle donne des résultats très satisfaisants ( $Nash > 0.81$ ). En quelque sorte cette "ré-évaluation" de la surface qui est équivalente à augmenter artificiellement la pluie nette, semble être suffisante pour s'approcher au mieux du fonctionnement du karst au vu des critères retenus et des échantillons pluie débit disponibles. Pour les modèles plus sophistiqués, on note une différence de comportement des modèles à deux réservoirs (S et RK) selon la période de mesure concernée. Pour la période P1, les modèles considérant un réservoir mixte représentatif du bassin versant superficiel et du bassin karstique ne permettent pas d'aboutir à un optimum. Par contre des résultats positifs sont obtenus avec les données de la deuxième période. Pour parvenir à un calage de paramètres qui restent dans des ordres de grandeur réalistes et qui soit satisfaisant sur l'ensemble des deux périodes, ce sont les modèles à trois réservoirs avec un fuite proportionnelle à la surface associée au réservoir K qui donnent des résultats adéquats. Cependant, c'est toujours sur la période P1, période pendant laquelle la contribution du karst a été la plus significative, que les résultats du calage sont le moins favorables.

Seuls, le modèle S-R<sub>surf</sub> (3 paramètres) et le modèle S-R-K<sub>fuites</sub> (6 paramètres) qui se sont montrés les plus performants lors du calage ont été retenus pour la validation. La phase de validation consiste à appliquer le modèle sur la période 2 avec les paramètres calés sur la période 1 et réciproquement. Ce test avec le modèle S-R<sub>surf</sub> conduit à des résultats comparables quelque soit la période choisie en référence (figure 3).

Avec le modèle à trois réservoirs le résultat est plus contrasté (figure 4). Appliquer le modèle avec les paramètres calés sur l'échantillon P1 à l'échantillon P2 conduit à une sur-estimation notable des débits. Le critère de Nash (0.49) rend compte de l'incapacité du modèle. Par contre, les paramètres calés sur P2 appliqués à P1 donnent des résultats ( $Nash = 0.80$ ) presque aussi satisfaisant que les valeurs du critère observées en calage.

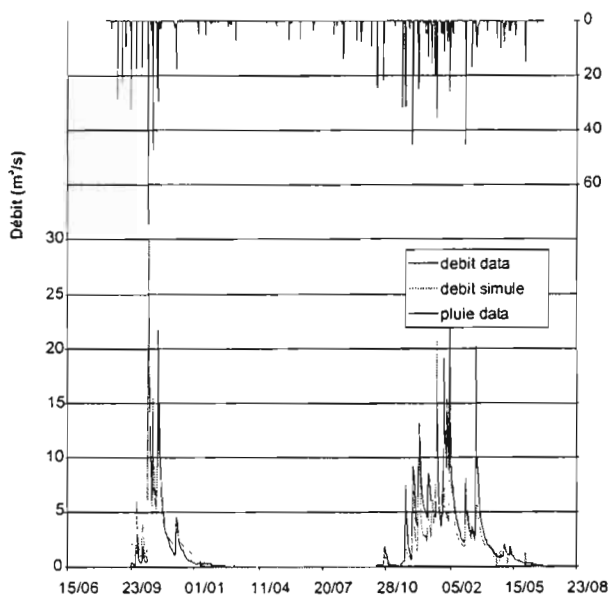
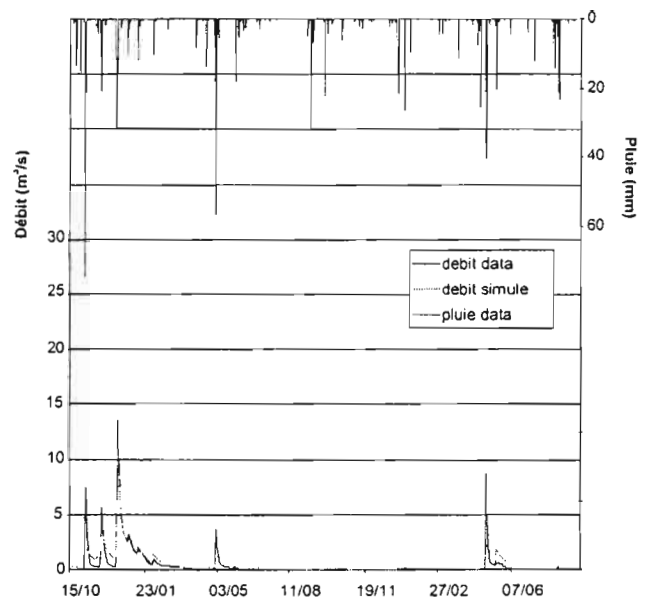


Fig. 3 : Validation modèle  $SR_{surf}$   
a) calage P2, validation P1 : Nash = 0.716



b) calage P1, validation P2 : Nash = 0.773

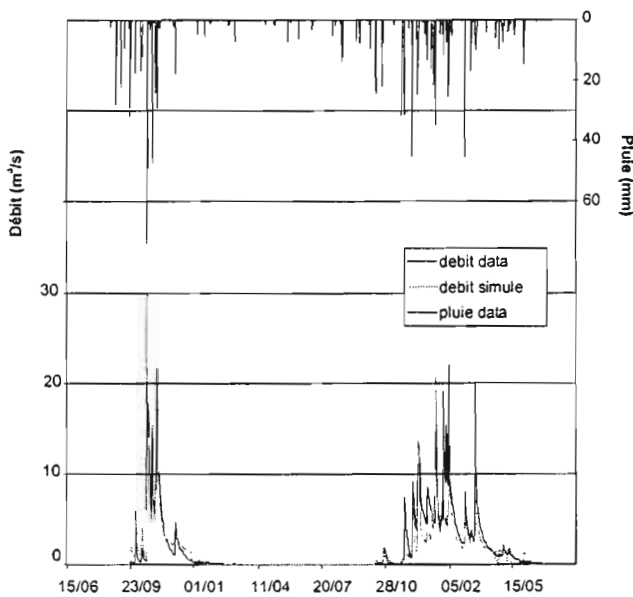
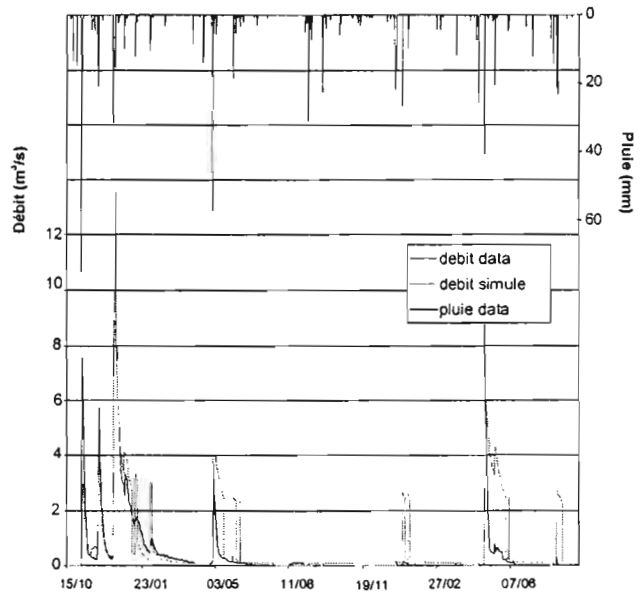


Fig. 4 : Validation du modèle  $S-R-K_{fuites}$   
a) calage P2, validation P1 : Nash = 0.798



b) calage P1, validation P2 : Nash = 0.491

## 5. CONCLUSION

Les différentes paramétrisations testées montrent qu'il est possible d'adapter l'architecture d'un modèle global afin de simuler le fonctionnement de bassins versants à composante karstique. Parmi les différentes paramétrisations testées, deux semblent plus adaptées à reproduire les écoulements dans un bassin karstique : le modèle incluant trois réservoirs (S-R-K) et la version simplifiée ( $S-R_{surf}$ ). En phase de calage les deux

modélisations S-R-K a six paramètres ou S-R<sub>surf</sub> à 3 paramètres sont tous les deux satisfaisants. Cependant, avec le jeu de données disponibles et en considérant les deux phases, calage et validation, le modèle à trois paramètres est le plus robuste.

La faible longueur des séries de données ne permet pas de pousser les tests beaucoup plus loin. Des informations précises sur le fonctionnement du karst seraient également nécessaires pour affiner sa prise en compte.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a pu être réalisée grâce à la contribution de C. Rodier.

## BIBLIOGRAPHIE

- EDIJATNO N., MICHEL C. 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres, La Houille Blanche, 2, 113-121.
- NAJEM W. , HREICHE A., BOCQUILLON C., (2000) Modélisation conceptuelle du transfert pluie débit du bassin de Nahr-Beyrouth. 14<sup>ème</sup> Réunion Scientifique, CNRS-LIBAN
- NAJEM W., BOCQUILLON C. et JABBOUR H, 2001. Analyse du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant Libanais par une modélisation conceptuelle adaptée au climat méditerranéen: cas du Nahr Beyrouth. Hydrologie des Régions Méditerranéennes, Montpellier, 11-13 Octobre 2000, ce volume.
- NASH, J.E. and SUTCLIFFE, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, 1. A discussion of principles. J. Hydrol., 10: 282-290.
- SINGH V.P., [Ed.], 1995 – Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resource Publications, Colorado, 1130 p.
- VEN TE CHOW, 1964, Handbook of applied hydrology, Mc Graw-Hill, New-York.

# MODELISATION DES LACHERS DE BARRAGE ET RECHARGE DE LA NAPPE DE KAIROUAN (TUNISIE)

Nazoumou Y. & Besbes M.

*Laboratoire de Modélisation en Hydraulique et Environnement, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, B.P. 37, le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie.*

## RESUME

Pour simuler la propagation et l'infiltration des lâchers de recharge de la nappe de Kairouan dans le lit des deux principaux oueds, un modèle semi-couplé intégrant les écoulements de surface et souterrains est mis au point. La propagation et l'infiltration des ondes de lâchers sont schématisées à l'aide d'un modèle à réservoirs qui réalise le bilan hydrique afin de quantifier le flux d'infiltration efficace. La zone non saturée assurant le transfert de cette infiltration efficace à la nappe est conceptualisée par une cascade de réservoirs de type modèle Nash. Enfin, la résolution numérique de l'équation de Boussinesq en 2D par la méthode des différences finies assure la prise en compte des écoulements dans la nappe.

L'ajustement du modèle sur deux épisodes de recharge permet de simuler de manière satisfaisante la propagation et l'infiltration des lâchers dans le lit des oueds. Ces résultats sont en outre confortés par la remontée piézométrique calculée de la nappe, qui concorde bien avec les mesures enregistrées lors de ces épisodes.

## MOTS CLES

Lâchers, propagation, infiltration, Recharge artificielle, remontée piézométrique, nappe, zone semi-aride

## INTRODUCTION

La plaine de Kairouan couvre une superficie de 3000 km<sup>2</sup> et constitue de ce fait le plus grand bassin aquifère de la Tunisie centrale (Fig.1). Dans cette zone semi-aride où la pluviométrie moyenne annuelle n'excède pas 300 mm/an, l'infiltration des eaux de crues des cours d'eau intermittents que sont les oueds Zeroud et Merguellil constitue la majeure source d'alimentation de la nappe. La maîtrise des risques d'inondation et la mobilisation des ressources en eau dans cette région caractérisée par l'irrégularité de ses précipitations ainsi que le caractère dévastateur des crues qui en découlent passent par une gestion conjointe de ses eaux superficielles et souterraines. La construction des barrages de Sidi Saâd sur l'oued Zeroud en 1982 et de celui d'El Haouareb sur l'oued Merguellil en 1988 s'inscrit bien dans cette optique.

Associés à l'augmentation des prélèvements souterrains passés de 30 Mm<sup>3</sup>/an en 1969 à 60 Mm<sup>3</sup>/an en 1998, ces aménagements ont eu pour conséquence, du mois dans une première période, une baisse du niveau piézométrique de la nappe de Kairouan.

Afin de remédier à ce déséquilibre, plus de 130 Mm<sup>3</sup> ont été mobilisés entre 1988 et 1997 sous forme d'ondes de lâchers dans le lit des oueds pour la recharge artificielle de la nappe. Les mesures de contrôle des débits ont été réalisées au niveau de plusieurs stations hydrométriques réparties le long des oueds. La réaction de la nappe a été suivie par les services de la Direction Générale des Ressources en Eau de Tunisie (DGRE), et ce grâce à un réseau de 50 points d'observations dont une partie seulement a pu être exploitée. Un modèle semi-couplé intégrant les écoulements de surface et souterrains a été développé afin de simuler la propagation et l'infiltration des ondes de crues, l'objectif étant d'évaluer l'efficacité de la recharge artificielle de la nappe par lâchers dans le lit.

## HYDROGEOLOGIE

La plaine de Kairouan est un bassin endoréique constitué par une vaste cuvette d'effondrement comblée par des dépôts détritiques continentaux d'âge Mio-plio-quaternaire (Fig. 1). Du point de vue lithologique, elle se caractérise par une sédimentation lenticulaire, formée par une alternance de sables passant à des grès, conglomérats, marnes et argiles sur une épaisseur variable, pouvant atteindre 700 m par endroits (Besbes, 1975). On note principalement deux niveaux aquifères : un aquifère à nappe libre relativement continu sur l'ensemble de la plaine, et un aquifère à nappe captive, de 50 à 100 m d'épaisseur qui se démarque à partir



d'une profondeur de 100 m, sauf dans la partie Ouest au débouché des oueds où les deux aquifères se confondent. En aval, dans la zone des exutoires, la nappe profonde se met en charge pour alimenter le niveau perméable supérieur.

Avant la construction des barrages, l'alimentation naturelle de la nappe a été estimée à  $57 \text{ Mm}^3/\text{an}$  (Besbes, 1975). Celle-ci était assurée à plus de 60 % par l'infiltration des eaux de crues des oueds Zeroud et Merguellil qui parcourent la plaine sur respectivement 40 et 30 km de tronçons favorables à la recharge. Le reste des apports était constitué par l'infiltration directe aux piedmonts des reliefs de bordures.

La zone non saturée sous le lit des oueds a une épaisseur variable entre 5 et 50 mètres. En amont de la station AER (Fig. 1) où elle est plus épaisse, cette zone est essentiellement constituée de formations perméables (sables, graviers et galets), tandis qu'en aval, son épaisseur diminue jusqu'à affleurement de la nappe au niveau des sebkhas, avec des formations plus argileuses.

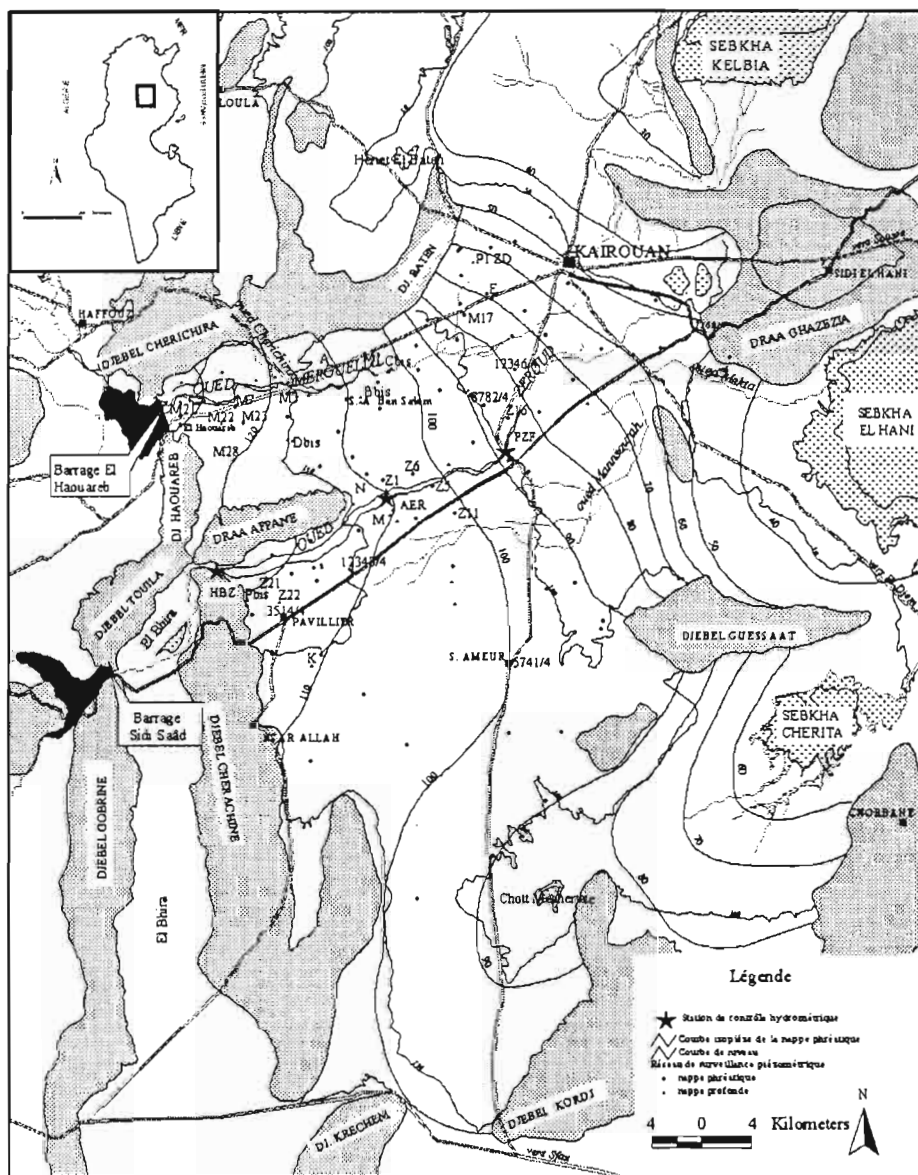


Fig. 1: Carte de situation, piézométrie de la nappe phréatique, points de surveillance hydrométrique et piézométrique de la nappe de Kairouan.

Les exutoires du système hydrogéologique sont formés d'une part par les limites hydrauliques que sont les sebkhas de bordures Chérta, El Hani, Kelbia et d'autre part par les prélèvements dans les puits de surface et les forages à des fins agricoles, industrielles et pour l'alimentation en eau potable. Aujourd'hui, l'exploitation des 3800 puits de la nappe phréatique est estimée à  $30 \text{ Mm}^3/\text{an}$  tandis que les 130 forages qui captent la nappe profonde produisent eux-mêmes environ  $30 \text{ Mm}^3/\text{an}$ .

## HYDROLOGIE

Avec des bassins versants de superficies respectives 8600 et 1100 km<sup>2</sup> situés en amont de la plaine de Kairouan, les oueds Zeroud et Merguellil constituent les principaux cours d'eau intermittents de la Tunisie centrale. La pluviométrie moyenne annuelle est de 400 mm dans les hauteurs amont des bassins et de 300 mm/an dans la plaine.

L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Riou donne une moyenne annuelle de 1700 mm/an ce qui pourrait justifier la faible participation de l'infiltration directe de la pluie dans l'alimentation de la nappe dans la plaine.

Les crues surviennent principalement durant l'automne. Elles sont généralement brèves, parfois très brutales. En régime naturel, l'apport total annuel moyen de crues à l'entrée de la plaine de Kairouan était de 94 Mm<sup>3</sup>/an pour l'oued Zeroud à la station de Sidi Saâd et 32 Mm<sup>3</sup>/an pour le Merguellil à El Haoureb. Auquel il faut ajouter 17 et 7 Mm<sup>3</sup>/an d'apports de base respectifs.

## RECHARGE ARTIFICIELLE PAR LACHERS DE BARRAGE

La recharge artificielle de la nappe de Kairouan est réalisée depuis 1988, grâce à des campagnes de durée limitée en fonction des ressources disponibles aux barrages. Une campagne est définie comme un événement de lâcher d'eau du barrage en continu ou par ondes successives, pendant plusieurs jours consécutifs dans le lit de l'oued pour la recharge de la nappe. La durée de l'onde varie entre 30 minutes et 16 heures et le protocole de lâchure est motivé par le souci de minimiser les pertes dues à l'évaporation et au ruissellement à l'aval de la zone d'alimentation de la nappe. Le suivi des ondes lâchées et de leur amortissement le long du lit est assuré grâce à des mesures de débits par jaugeage au niveau des stations de contrôle choisies à cet effet (Fig. 1). Au total 7 campagnes de recharge ont été réalisées entre 1988 et 1997, essentiellement à partir du barrage de Sidi Saâd. Ces campagnes ont fait l'objet de plus de 1000 jaugeages de débit et ont mobilisé près de 130 Mm<sup>3</sup> d'eau dont 124 Mm<sup>3</sup> à partir du seul barrage de Sidi Saâd. Cependant, la régularité et le nombre des mesures effectuées varient d'une campagne à l'autre rendant difficile une analyse exhaustive des données, à l'exception de celles de la campagne du 19 juin au 19 juillet 1995 sur l'oued Zeroud pour laquelle on dispose d'un suivi relativement régulier (Chaieb et al., 1995). Ces mesures ont servi de référence pour le calage du modèle d'écoulement de surface. Au cours de cette campagne, 61 ondes de lâchers couvrant 406 heures ont été émises, pour un volume mobilisé de 15 Mm<sup>3</sup>. Sur deux ondes lâchées quotidiennement durant la campagne, seule l'onde diurne a été suivie, avec toutefois des lacunes, particulièrement au niveau des stations AER et PZF (Fig. 1).

L'évolution des débits de pointe mesurés aux stations durant toute la campagne a montré que pour un même débit moyen de lâcher au barrage, le débit de pointe à la station de contrôle décroît progressivement durant les premiers jours de la campagne, avant d'atteindre une valeur relativement constante autour de laquelle il va se stabiliser. Cette décroissance du débit dénote une variation des propriétés d'infiltration du lit de l'oued et à travers la zone non saturée, due à l'effet de l'air occlus (Nazoumou et Besbes, 2000).

## PRESENTATION DU MODELE

### Propagation - infiltration de lâchers dans le lit de l'oued

Dans des régions arides et semi-arides, les données nécessaires à l'application sur un bief naturel de modèles dits hydrologiques de Muskingum et Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969 ; PONCE et YEVJEVICH, 1978) ou de modèles hydrauliques simplifiés d'ondes cinématique ou diffusante déduits des simplifications des équations de Saint-Venant sont rarement disponibles. Dans ces conditions, un modèle conceptuel basé un nombre limité de paramètres peut avoir des avantages indéniables, dès lors qu'il aboutit à des résultats acceptables. Par ailleurs, ce sont là des conditions d'application particulièrement spécifiques : dans de tels milieux, la part de l'infiltration est aussi considérable que celle du ruissellement, ce qui diminue l'intérêt des modèles de propagation pure.

Pour schématiser le cycle de l'eau dans un bief élémentaire du système oued/zone non saturée et réaliser un bilan hydrique de la recharge, une approche basée sur le principe de la fonction de production « type sol » des modèles classiques à réservoirs a été adoptée (Roche, 1970 ; Besbes, 1978). Cette méthode a

été déjà utilisée de façon satisfaisante pour la modélisation de l'épandage des crues dans les zones semi-arides à l'aide du code MECRA (Djebbi et al., 1991 ; Ezzeddine et Besbes, 1991).

Le principe de fonctionnement de la fonction de production adoptée et du modèle d'écoulement de surface a été présenté dans une publication récente (Nazoumou et Besbes, 2000). On part du principe (Fig. 2) que la zone non saturée peut être divisée en deux horizons : (1) une zone d'échange ou d'évapotranspiration (le sol), caractérisée par une réserve en eau très variable ; (2) une zone de percolation, d'humidité constante, égale à la capacité au champ, de manière à garantir la conservation de la masse. L'entrée de cette zone est l'infiltration nette ( $I$ ) qui "transférée" par la zone de percolation constituera l'alimentation de la nappe, infiltration différée dans le temps (Besbes et De Marsily, 1984). La fonction de production schématise le fonctionnement de la zone d'échange et peut être représentée à l'aide d'un réservoir de bilan et deux réservoirs dits de transfert en série comme indiqué sur la Fig. 3. Elle a pour but de représenter la répartition de l'apport total à un bief élémentaire de l'oued en évapotranspiration, infiltration, ruissellement, et stockage dans la zone non saturée.

Le réservoir de bilan permet d'effectuer à chaque pas de temps le bilan hydrique, en fonction de l'apport au système  $A$ , l'évapotranspiration réelle  $ETR$  et l'état du stock en eau du réservoir  $S_i$ . La quantité disponible pour l'écoulement ou apport efficace  $E$  est déterminée par le paramètre  $C_{rmax}$  qui représente le niveau maximal de réservoir sol. Un premier réservoir de transfert prend ensuite la relève pour répartir l'apport efficace entre l'infiltration efficace  $I$  et le ruissellement potentiel  $R_p$ , en fonction paramètre  $C_i$  ou seuil maximal d'infiltration. Le dernier réservoir de transfert a pour but d'apporter un retard éventuel au ruissellement en fonction du stock superficiel et du ruissellement effectif  $R_e$ , selon le principe d'une vidange exponentielle (Roche, 1970 ; Girard, 1982 ; Ledoux et al., 1984).

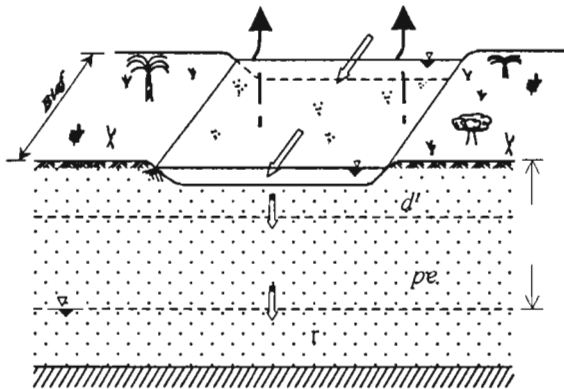


Fig. 2: Schéma conceptuel de la zone non saturée.

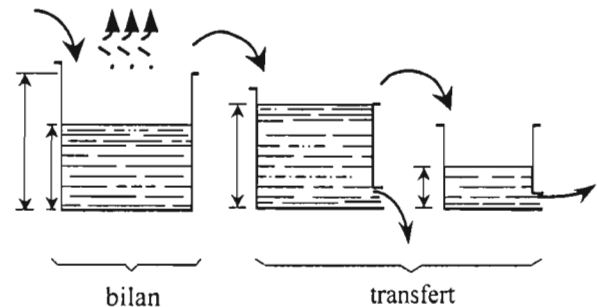


Fig. 3: Principe de fonctionnement de la fonction de production.

L'algorithme de propagation considère l'oued et ses affluents principaux comme une arborescence de biefs se vidant les uns dans les autres d'amont vers l'aval. Les biefs sont définis par regroupement de mailles offrant à l'eau la même durée de transfert et sont généralement associés, à l'exutoire, à une station de mesures hydrométriques. Chaque maille fonctionne comme une fonction de production décrite plus haut et est alimentée par le débit sortant de celle qui la précède. Cette approche permet la discrétisation spatiale du lit de l'oued en plusieurs mailles dont la longueur dépend des objectifs de précision recherchés et dont la largeur équivaut à la largeur inondée du lit. Ainsi, le débit peut être simulé à n'importe quel point du lit, offrant alors une possibilité de comparaison avec les données des stations de contrôle.

la variation de la surface inondée du lit au cours de la crue est prise en compte à l'aide d'une fonction empirique donnant la largeur inondée en fonction du débit, sous la forme (Ezzeddine et Besbes, 1991) :

$$l = \text{Min}(\beta \cdot \log_{10}(A + 1), l_{\text{max}}) \quad (1)$$

Où  $l$  est la largeur inondée du lit (m) ;  $\beta$  est une constante d'ajustement de cette largeur (m) ;  $l_{\text{max}}$  la largeur maximale du lit de l'oued (400 m).

Le modèle ainsi défini possède quatre paramètres, qui doivent être déterminés par calage : (1) la constante d'ajustement de la largeur inondée du bief  $\beta$  ; (2) la réserve facilement utilisable  $RFU$  qui définit la capacité maximale de rétention du réservoir sol  $Cr_{max}$  ; (3) la perméabilité  $K$  qui définit la capacité maximale d'infiltration  $Ci$  et (4) la constante de tarissement exponentiel du réservoir de transfert superficiel,  $\alpha$ .

L'augmentation de la capacité d'infiltration du lit mise en évidence par l'analyse de l'amortissement des débits de pointe est prise en compte à l'aide d'une loi de variation linéaire de  $K$ , adoptée sous la forme (NAZOUMOU, 1996) :

$$K = K_0 + \varepsilon t \text{ si } t < t_s \text{ avec : } \varepsilon = \frac{K_s - K_0}{t_s} \quad (2)$$

$$K = K_s \text{ si } t \geq t_s \quad (3)$$

Où  $K$  la perméabilité du lit à l'instant  $t$  (mm/j) ;  $K_s$  la perméabilité stabilisée ou à saturation du milieu poreux (mm/j) ;  $K_0$  la perméabilité initiale (mm/j) ;  $t$  le temps (j) ;  $\varepsilon$  est la pente de la droite de variation de  $K$  et  $t_s$  délai de stabilisation de  $K$  (j).

Le calage du paramètre  $K$  revient à déterminer  $K_0$  et  $K_s$  ;  $t_s$  étant estimé par l'analyse de la courbe de décroissance des débits de pointe.

### Transfert dans la zone non saturée

Selon son épaisseur au dessus de la nappe libre et les caractéristiques hydrodynamiques du milieu qui la constitue, la zone non saturée est susceptible de moduler l'infiltration efficace  $I$  déterminée par la fonction de production. A l'échelle d'une parcelle de terrain, échelle à laquelle se réfèrent généralement les mesures dans la zone non saturée, les effets des processus physiques individuellement non linéaires et de grande variabilité spatiale qui régissent l'écoulement dans la zone non saturée peuvent être pris en compte dans le calcul de transfert. A l'échelle régionale par contre, étant donné qu'il est difficile voire impossible de recueillir des informations sur la répartition spatiale de la perméabilité, la zone non saturée peut être considérée comme une «boite noire» représentant un système linéaire dans lequel les mécanismes physiques ne sont en pris en compte que sous l'aspect de leur manifestation globale, c'est à dire la liaison entre le débit d'infiltration et le débit de l'alimentation (Besbes, 1978). A l'instar de ce qui a été adopté dans la représentation des écoulements de surface, une modélisation paramétrique, mise en œuvre sur des zones homogènes au moyen d'une loi théorique dépendant d'un nombre limité de paramètres a été réalisée. Plusieurs travaux concernant la recherche d'une relation à l'échelle régionale entre infiltration et alimentation des nappes (Besbes, 1979 ; Ledoux, 1980 ; Benhalima et al., 1998) ont démontré que la zone non saturée peut être assimilée à un modèle à réservoirs en cascade tel celui de J. E. Nash. Un tel modèle dépend de deux paramètres : le nombre de réservoirs  $n$  ou paramètre de forme qui caractérise l'épaisseur de la zone non saturée supposée décomposée en  $n$  couches horizontales homogènes et la contante  $k$  de vidange du réservoir, qui représente la vitesse de percolation verticale de l'eau. Ces paramètres sont déterminés par calage du modèle sur une série de mesures piézométriques.

### Écoulement dans la nappe

Les écoulements horizontaux bidimensionnels dans un aquifère sont décrits par l'équation de diffusivité ou les équations de Boussinesq en nappe libre et captive. En pratique, dans la simulation des écoulements souterrains dans un domaine bidimensionnel et horizontal on regroupe ces équations dans l'équation aux dérivées partielles suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + q \quad (4)$$

où  $T$  et  $S$  sont respectivement la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère ;  $h$  est la charge hydraulique ;  $q$  représente le débit injecté ou prélevé par unité de surface, supposé indépendant de la variable d'état  $h$ .  $q$  intègre également le débit de recharge de l'aquifère à travers sa surface libre.

Le code utilisé est le logiciel MULTIC, élaboré au Laboratoire d'Hydraulique de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis. Il permet la simulation des transferts de charges en régime permanent ou transitoire dans un aquifère multicouche. L'équation (4) y est intégrée sur un domaine multicouche quelconque,

découpé en mailles carrées régulières. Les dérivées spatiales sont approximées par différences finies tandis que l'approximation temporelle est réalisée à l'aide d'un schéma implicite pur. Le système d'équation qui en découle est résolu numériquement par la méthode de Gauss-Seidel avec surrelaxation par point. Trois types de conditions aux limites sont intégrés dans le modèle : charge hydraulique imposée (condition de Dirichlet), flux imposé (Neumann) et flux dépendant de la charge (Fourier).

### Semi couplage des modèles

La problématique d'une simulation conjointe des modèles d'écoulements réside essentiellement dans la résolution de phénomènes à des pas de temps fort différents qui caractérisent la dynamique des eaux de surface et souterraines. La plupart des modèles couplés sont conçus de façon à faire appel alternativement à des codes de simulation des écoulements de surface et souterrains, en considérant que l'état de la nappe est constant pendant plusieurs pas de temps successifs du modèle de surface (Ledoux, 1984 ; Tadjar, 1993).

L'intérêt des modèles couplés est d'autant plus grand que la connexion hydraulique entre la nappe et la rivière est permanente et clairement établie. Dans ces conditions, les échanges nappe/rivière dépendent essentiellement de l'état de la nappe. En conditions arides et semi-arides où les rivières sont intermittentes et généralement sèches en dehors des périodes de crues, la connexion hydraulique directe est rarement établie. Les échanges sont à sens unique (recharge) et sont essentiellement dirigés par les caractéristiques hydrodynamiques de la zone non saturée. Le flux de recharge ne parvient à la nappe qu'après un délai de transfert donc la durée varie de quelques jours à quelques mois. Cette observation permet de concevoir un modèle de simulations "semi-couplé" dans lequel on ferait successivement appel aux codes de simulation des écoulements de surface, de transfert dans la zone non saturée et des écoulements souterrains sur toute la période de calcul, selon le principe représenté sur la Fig. 4.

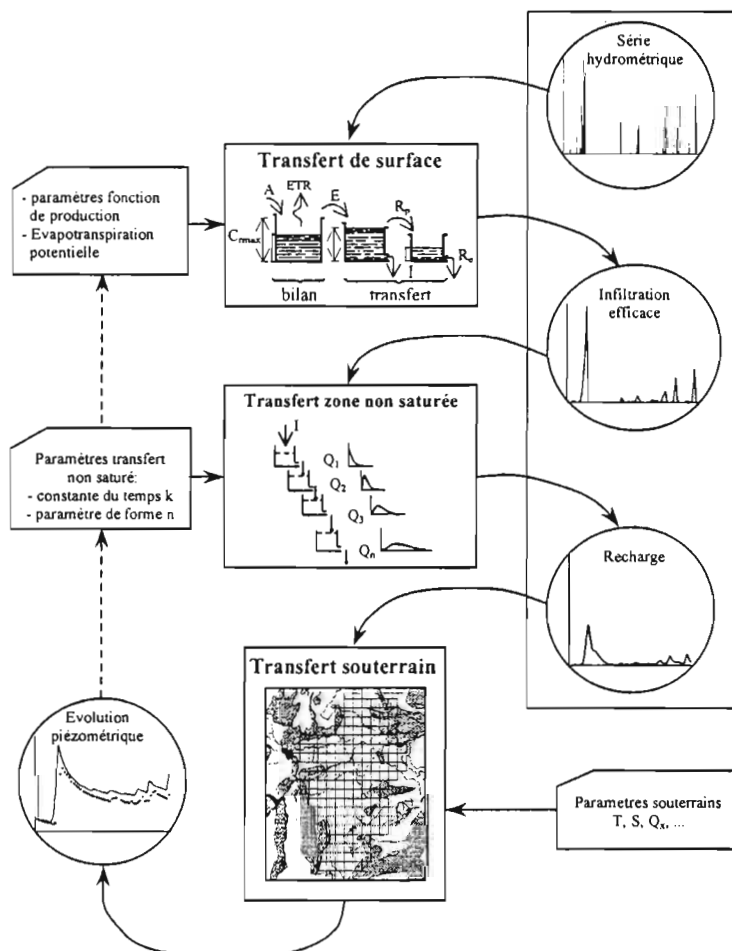


Fig. 4 : Schéma du principe de fonctionnement du modèle semi-couplé

Le fonctionnement du modèle semi-couplé peut ainsi être décrit comme suit :

- 1- Partant des données hydrométéorologiques et des caractéristiques hydrodynamiques du lit de la rivière, on simule d'abord la propagation et l'infiltration des crues sur toute la période de calcul. Les paramètres du modèle sont fixés sur la base de ceux obtenus lors d'un calage préliminaire et séparé du modèle de surface et qui constituent des ordres de grandeur à ajuster. L'historique d'infiltration ainsi calculé constituera l'entrée du modèle de transfert dans la zone non saturée.
- 2- Le transfert dans la zone non saturée de l'infiltration efficace résultant du modèle de surface est ensuite calculé. Le paramètre de forme  $n$  de chaque maille de transfert est fixé en fonction de l'épaisseur de la zone non saturée. La constante du temps  $k$  est initialisée à une valeur unitaire. Cela permet de constituer un historique de recharge de la nappe, condition aux limites supérieures de modèle d'écoulements souterrains.
- 3- On fait alors appel à MULTIC, afin de calculer l'évolution des charges hydrauliques dans la nappe et on compare les niveaux piézométriques calculés et mesurés en des points de contrôle représentatifs pour lesquels les mesures sont disponibles.
- 4- Si la piézométrie calculée est analogue aux mesures, le calage est alors acceptable et l'historique d'infiltration calculé en 2 constituera la charge de la nappe sur la période considérée.
- 5- Si par contre l'évolution piézométrique calculée à l'aide du modèle de nappe est assez différente de la série mesurée, on ajuste le coefficient d'emménagement de l'aquifère jusqu'à avoir la meilleure analogie possible.
- 6- Si l'ajustement de l'emménagement de la nappe en 5 ne conduit pas à une amélioration de la reconstitution des niveaux piézométriques, on répète les points 2 à 3 jusqu'à avoir le meilleur réajustement des paramètres de la zone non saturée.
- 7- Si la procédure énumérée au point 6 s'avère insuffisante, on remonte au point 1 pour réajuster dans le sens adéquat, les paramètres de la fonction de production puis on répète ainsi les points 2 à 6 jusqu'à avoir une reconstitution acceptable du comportement du système aquifère.

Ce schéma de principe de fonctionnement du semi-couplé nécessite de disposer d'un modèle de nappe préalablement ajusté en régime permanent sur un état moyen de la nappe.

## MISE EN OEUVRE DU MODELE SUR LA RECHARGE ARTIFICIELLE

### Caractéristiques du modèle conceptuel

Le modèle conceptuel du système hydrogéologique de la nappe de Kairouan comporte deux couches : La couche 1 qui représente la nappe phréatique et une deuxième, la couche 2 pour schématiser le niveau captif profond. Ces deux couches communiquent par l'intermédiaire d'un semi-perméable supposé continu sur l'ensemble de la plaine. Le tracé des lits des oueds sièges des transferts de surface est représenté par des rangées de mailles fictives de dimensions identiques aux mailles de la couche de la nappe superficielle auxquelles elles se superposent.

En régime permanent, une condition de potentiel imposé a été affichée sur toutes les limites de la couche 1 à l'exception du seuil de d'El Haouareb. Cette représentation a permis d'estimer les flux d'alimentation aux piedmonts des Djebels et les sorties aux exutoires constitués par les sebkhas. Les valeurs des potentiels imposés ont été estimées à partir de la carte piézométrique de l'état de janvier 1969. En profondeur, toute limite occidentale est considérée comme étanche (Besbes, 1975). Les échanges nappe/ri vière, sont représentés en imposant aux mailles rivières le débit de recharge par les oueds, transféré par la zone non saturée à la nappe.

Cumulée sur deux couches, la superficie de l'aquifère de Kairouan équivaut à  $2 \times 3000 \text{ km}^2$  de nappe à représenter dans le modèle conceptuel qui doit en outre tenir compte de la répartition des informations hydrogéologiques essentiellement concentrées dans la zone du lit des oueds, de la largeur des lits et de la diffusivité de la nappe. Une discrétisation en mailles de  $1 \times 1 \text{ km}$  semble être la limite supérieure dictée par les conditions ci-dessus. Un maillage régulier tel imposé par l'outil de simulation nécessitera près de 6000 mailles de calculs, ce qui rendra le modèle difficilement maniable, avec un temps de calcul fort prohibitif. Afin de satisfaire l'objectif essentiel d'estimation de la recharge de la nappe tout en respectant les contraintes pratiques ci-dessus énumérées, un double modèle hydrogéologique a été adopté. Il consiste à concevoir un premier modèle d'ensemble (ME) de tout le système aquifère avec des mailles de  $4 \times 4 \text{ km}$ , dont le but





Les étapes (1) et (2) sont présentées dans Nazoumou et Besbes (2001). On se bornera dans ce qui suit à énumérer succinctement les grandes lignes de ces étapes, avant de présenter les résultats du modèle sur la simulation des lâchers.

La première étape du calage consiste en l'ajustement du ME en régime permanent. La carte piézométrique de janvier 1969, représentative d'un état moyen du système aquifère a été choisi comme référence à cet effet. Après ajustement des paramètres hydrauliques et des conditions aux limites du ME, le bilan en eau du système aquifère s'établit à 2070 l/s entrée/sortie.

Le calage en régime permanent du ME a été suivi d'un ajustement en régime transitoire par phases mensuelles. La période allant de janvier 1969 à 1974 et couvrant les crues exceptionnelles de l'automne 1969 a été prise comme référence afin d'ajuster le coefficient d'emménagement et la porosité efficace des nappes et estimer ainsi la recharge occasionnée par cet événement. Une fois ces paramètres évalués, le ME est ensuite appliqué à tout l'historique disponible de janvier 1969 à décembre 1998, afin de quantifier d'une part la chronique de recharge correspondante et d'autre part de calculer les potentiels aux limites artificielles du SM. Ce dernier est ensuite exécuté et réajusté en régime permanent puis en transitoire. Les conditions initiales et aux limites du SM dérivent du ME, sauf sur les limites artificielles où le potentiel calculé à l'aide du ME a été imposé. A titre d'exemple, la Fig. 6 montre l'évolution piézométrique calculée et observée sur la période transitoire 1969/1998 au piézomètre A (Fig.1).

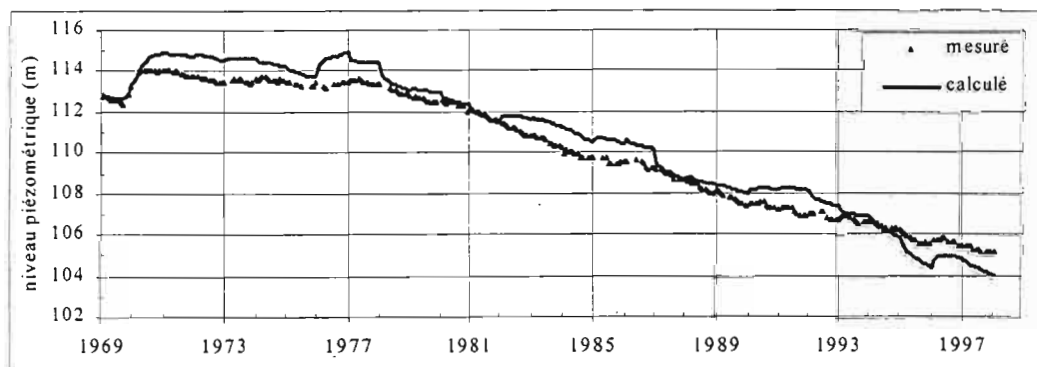


Fig. 6: Evolution piézométrique calculée et mesurée sur la période 1969-1998 au piézomètre A.

Dans la mesure du possible, le calage du modèle semi-couplé est conduit en 2 phases, visant à séparer au maximum les écoulements de surface des écoulements souterrains (Ledoux, 1984 ; Tajjar, 1993). En pratique plusieurs allers et retours ont été nécessaires jusqu'à l'obtention de meilleurs résultats. La méthodologie consiste à effectuer d'abord un bilan approché des écoulements de surface à l'aide de la fonction de transfert, suivi d'une réévaluation complète lors du transfert dans la zone non saturée et dans la nappe.

Les simulations ont concerné d'une part la campagne de recharge du 19 avril au 8 mai 1993 sur l'oued Merguellil pendant laquelle 5 Mm<sup>3</sup> ont été lâchés à partir du barrage El Haouareb et d'autre part celle réalisée entre le 19 juin 1995 et le 31 janvier 1997 sur le Zeroud et qui a permis de mobiliser 66 Mm<sup>3</sup> sous forme d'onde de lâchers et près 50 Mm<sup>3</sup> de déversement, auxquels il faut ajouter 28 Mm<sup>3</sup> directement transférés à l'entrée de la plaine par le biais d'une conduite d'amenée à raison de ~1 m<sup>3</sup>/s. Pour tenir compte du délai de réaction de la nappe, les simulations ont été réalisées par phases "décadaires" sur des périodes étalées respectivement du 1<sup>er</sup> avril au 31 décembre 1993 soit 27 phases de 10 à 11 jours pour le Merguellil et du 1<sup>er</sup> juin 1995 au 30 juin 1997 soit 75 phases pour le Zeroud.

L'ajustement de la fonction de production a été réalisé sur un échantillon de 6 ondes de crues observées entre le 19 et 24 juin 1995 au niveau de trois stations de contrôle définissant trois biefs principaux le long de l'oued Zeroud (Nazoumou, 1996). Le bief 1 d'une longueur de 15 km correspond à la structure d'El Bhira, entre le site du barrage et la station de Henchir Bouzid (HBZ) considérée comme l'entrée de la plaine de Kairouan. Le bief 2 et le bief 3 de longueurs respectives 15 km et 10 sont contrôlés respectivement à la sortie par les stations de Argoub Erremth (AER) et Pont Zaâfrana (PZF). Le calage du bief 1 bien que n'appartenant pas à la plaine de Kairouan est indispensable puisqu'il permettra de déterminer le transfert entre le barrage et la plaine et d'évaluation ainsi le volume effectivement parvenus à la zone de recharge. Lors du calage de chaque bief, l'hydrogramme d'entrée est constitué par les débits mesurés à la station amont tandis que ceux observés à l'aval servent de valeurs de référence pour le calage.



Deux critères de calage ont été utilisés : (1) l'erreur sur le temps ou déphasage  $eT$  qui représente le ratio du déphasage entre les centres de gravité des hydrogrammes de sortie mesuré et calculé, par l'intervalle de temps entre les centres de gravité des hydrogrammes d'entrée et de sortie mesurés du bief ; (2) l'erreur sur le volume  $eV$ , ratio de la différence entre les volumes correspondant aux hydrogrammes de sortie mesuré et calculé par le volume correspondant à l'hydrogramme mesuré à la sortie du bief.

Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les valeurs des paramètres regroupées dans le tableau 1. Ces valeurs confirment la relative hétérogénéité constatée dans la lithologie des formations sous le lit de l'oued (Nazoumou et Besbes, 2000).

D'une manière générale, les erreurs d'ajustement obtenues varient d'une onde à l'autre et selon la position du bief par rapport à l'entrée de la plaine. Elles découlent d'un compromis entre les deux critères de calage, avec toutefois une certaine préférence pour  $eV$  lorsque cela s'avérait possible. Pour le bief 1, l'erreur  $eT$  est relativement stable, comprise entre 12 % et 15 %, avec une moyenne de 14 % sur toute la période. Pour le bief 2 en revanche, on note une assez grande disparité d'une onde à l'autre, entre -36 % pour l'événement du 19 juin et 18 % pour celui du 26 juin. La moyenne sur toute la période reste néanmoins acceptable autour de -6 %. La même tendance s'observe au niveau du bief 3, avec une nette amélioration pour les dernières crues. La moyenne des erreurs sur ce bief s'établit à 12 %. En outre, les hydrogrammes calculés présentent une allure conforme aux mesures (Fig. 7), même si quelques anomalies persistent notamment sur le bief 3 où la précision des mesures de débits est faible.

TABLEAU 1 : Valeurs ajustées des paramètres de la fonction de production.

Paramètre	Bief 1	Bief 2	Bief 3
$RFU$ (mm)	50	50	30
$K_o$ (mm/j)	250	400	400
$K_s$ (mm/j)	400	1000	800
$\beta$ ( m )	35	40	40
$\alpha$ ( - )	0,7	0,7	0,55
$t_s$ ( j )	10	8	5

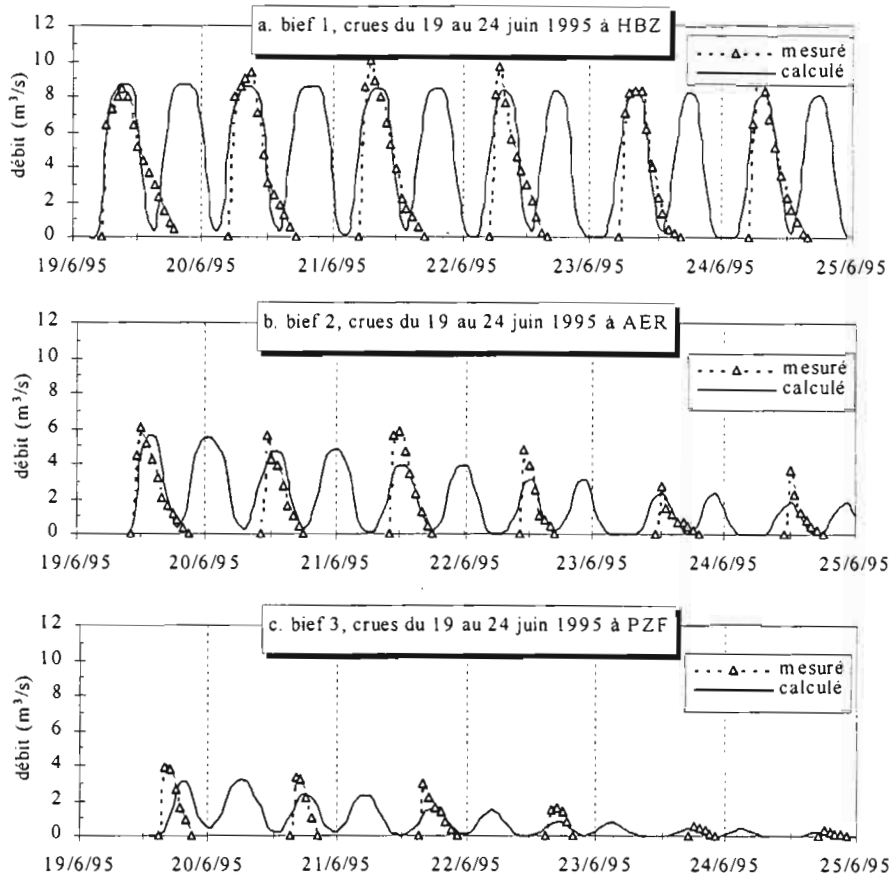


Fig. 7: Hydrogrammes calculés et mesurés du 19 au 24 juin 1995 aux stations de contrôle hydrométriques.

L'erreur sur le volume est dans l'ensemble moins importante que celle sur le temps. Pour le bief 1 elle se situe entre -3 % et 9 %, pour une moyenne de -0.36 % sur l'ensemble de la période. Elle est par contre plus importante et variable en aval. Quoique atteignant 40 % pour l'événement du 23 juin elle reste généralement comprise entre -9 % et 12 % sur les biefs 2 et 3.

L'ajustement des paramètres souterrains a pour but de vérifier que le volume infiltré calculé par la fonction de production et transféré à la nappe par la zone non saturée est bien à l'origine des remontées piézométriques mesurées durant la campagne de recharge. Les transmissivités et coefficients d'emménagement du SM ont d'ores et déjà été déterminés lors du calage du ME et réajustés éventuellement sur le SM. L'ajustement du modèle souterrain sur la recharge artificielle revient à ajuster essentiellement les paramètres de transfert dans la zone non saturée.

Les Fig. 8a-b montrent les résultats du calage aux piézomètres M21 et M22 pour la recharge de 1993 sur le Merguellil tandis que ceux correspondant à l'épisode de 1995-97 du Zeroud aux piézomètres Z11 et Z21 sont illustrés sur la Fig. 8c-d. Les niveaux piézométriques calculés aux centres des mailles présentent un bon synchronisme avec les charges mesurées aux piézomètres. L'erreur moyenne absolue et l'écart type des erreurs restent dans un ordre acceptable, entre 0,01 m et 0,18 m pour les piézomètres du Merguellil et entre -0,87 m et 1,94 m pour ceux du Zeroud.

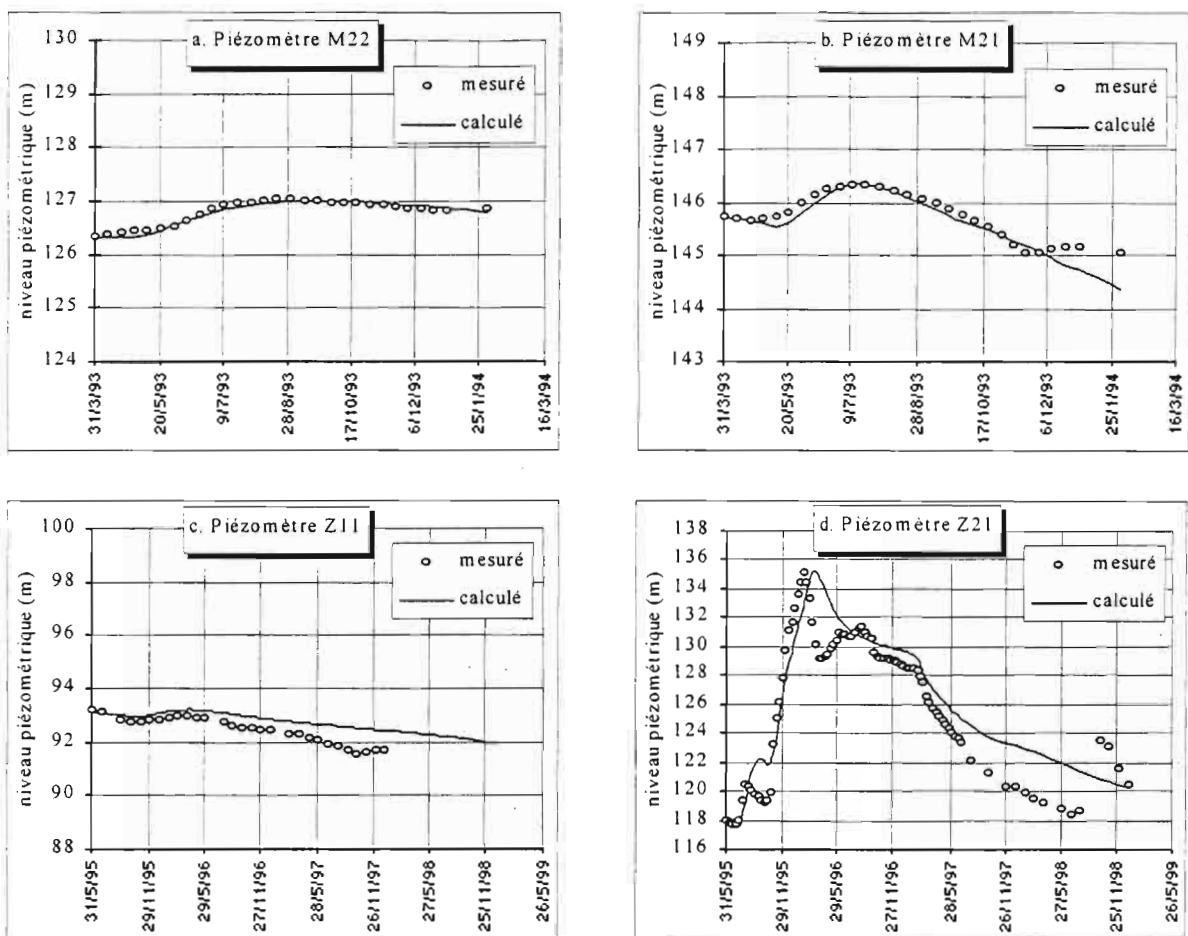


Fig. 8: Remontées piézométriques calculée et mesurée de la nappe suite à la recharge artificielle.

## CONCLUSIONS

Pour simuler la propagation et l'infiltration des lâchers dans le lit de l'oued et réaliser le bilan hydrique de la recharge, un modèle semi-couplé intégrant les écoulements de surface et souterrains est mis au point. La propagation et l'infiltration des ondes de lâchers sont schématisées à l'aide d'un modèle à réservoirs qui réalise le bilan hydrique afin de quantifier le flux d'infiltration efficace. La zone non saturée assurant le transfert de cette infiltration efficace à la nappe est conceptualisée par une cascade de réservoirs de type modèle Nash. Enfin, la résolution numérique de l'équation de Boussinesq en 2D par la méthode des différences finies assure la prise en compte des écoulements dans la nappe.

L'application du modèle sur deux épisodes de recharge montre que le modèle simule de manière satisfaisante la recharge artificielle en reproduisant d'une part la série de mesures hydrométriques et d'autre part les remontées piézométriques observées suite à la recharge. Bien que la validation reste insuffisante en raison de la rareté des données, ce modèle peut constituer un premier outil d'évaluation de l'efficacité de la recharge.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BENHALIMA K., BENHAMMOU A., LAKHAL E. K., DAHOU B., 1998. Parameter's sensitivity in water storage modelling for unsaturated soils. In: *Recent advances in problems of flow and transport in porous media*. Crolet J. M., Hari M. E. (editors), Kluwer Academic Publishers, Netherlands, p. 59-75.
- BESBES M., 1975. Etude hydrogéologique de la plaine de Kairouan sur Modèles mathématiques. CIG-EMP/DGRE, Fontainebleau, France, *Rapport scientifique LHM/RD/75/16*, 121 p.
- BESBES M., 1978. Estimation des apports aux nappes souterraines. Un modèle d'infiltration efficace. *Th. Doct. es. Sc.*, Univ. Paris VI, 270 p.

- BESBES M., DE MARSILY G., 1984. From infiltration to recharge : use of a parametric transfer function. *J. Hydrol.*, 74, 271-293.
- BOUZAÏANE S., LAFFORGUE A., 1986. Monographie des oueds Zeroud et Merguellil. ORSTOM / DGRE, Tunis, Tunisie, *Rapport scientifique*, 600 p.
- CHAIËB H., CHADLY B., AYACHI M., 1995. Note sur la recharge de la nappe de Kairouan par les lâchers du barrage de Sidi Saâd, campagne du 19 juin au 19 juillet 1995. DGRE, Tunis, note inter., 10 p.
- CUNGE J.A., 1969. On the subject of flood propagation computational method (Muskingum method). *J. Hydraul. Res.*, 7(2), 205-230.
- DJEBBI M., BESBES M., MAALEL K., 1991. Modèle d'épandage des eaux des crues dans les régions arides "MECRA". Notice et exemple d'utilisation. ENIT, Tunis, Tunisie, *Rapport scientifique*, 21 p.
- EZZEDDINE S., BESBES M., 1991. un modèle hydrologique à réservoirs pour la simulation des épandages des crues. *Les Annales Maghrébines de l'ingénieur*, 5(2), 105-126.
- GIRARD G., 1982. Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs. Modèle MODLAC. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 19(2), 55-72.
- GRISMER M. E., ORANG M. N., CLAUSNITZER V., KINNEY K., 1994. Effects of air compression and counterflow on infiltration into soils. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 120(2), 775-795.
- LEDoux E., GIRARD G., VILLENEUVE J. P., 1984. Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *Houille Blanche*, 1, 101-110.
- NAZOU MOU Y., 1996. Modélisation de la recharge artificielle des nappes de la plaine de Kairouan. *Mémoire de DEA*, ENIT, Tunis, Tunisie, 104 p.
- NAZOU MOU Y., BESBES M., 2000. Simulation de la recharge artificielle de nappe en oued par un modèle à réservoirs. *Revue des Sciences de l'Eau*, (à paraître).
- NAZOU MOU Y., BESBES M., 2001. Recharge assessment and groundwater modeling in arid conditions. Case study at Kairouan, Tunisia. *Proceedings of the IAHS 6TH Scientific Assembly, Maastricht, The Netherlands, 18-27 July 2001*. Hans Gehrels editor. (à paraître).
- PONCE V. M., YEVJEVICH V., 1978. Muskingum-Cunge method with variable parameters. *ASCE J. Hydraul. Div.*, 104 (HY12), 1663-1667.
- ROCHE M., 1970. Les divers types de Modèles déterministes. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 7(4), 39-66.
- TAJJAR M. H., 1993. Modélisation hydrodynamique des échanges nappe-rivière : Simulation d'une lâchure expérimentale en seine en période d'étiage. *Th. doct.*, ENSMP, Paris, 174 p.
- VACHAUD G., GAUDET J. P., KURAZ V., 1974. Air and water flow during ponded infiltration in a vertical bounded column. *J. Hydrol.*, 22, 89-108.
- VACHAUD G., VAUCLIN M., KHANDJI D., WAKIL M., 1973. Effect of air pressure on a water flow in an unsaturated stratified vertical column of sand. *Water Resour. Res.*, 9(1), 160-173.
- WANG Z., FEYEN J., NIELSEN D. R., van GENUCHTEN M. T., 1998. Air entrapment effects on infiltration rate and flow instability. *Water Resour. Res.*, 34(2), 213-222.
- WEIR J. G., KISSLING M. W., 1992. Influence of air flow on the vertical infiltration of water into soil. *Water Resour. Res.*, 28(10), 2765-2772.



# MEASUREMENT OF SOIL MOISTURE IN SMALL CATCHMENTS: A NEW TOOL

Ramadan R., Job J.O.,

*Centre Régional de l'Eau et de l'Environnement, Université S' Joseph, ESIB, B.P.11-1514, Beyrouth, Liban.*

## ABSTRACT

Non destructive methods for measuring soil water content are based mainly on sensors permanently placed into the soil. Repetitive measurement with probes is time consuming and the volume of soil investigated is generally small. For these reasons probes are not practical for the determination of soil moisture in small water catchments. Recently, attempts have been made to use electromagnetic methods to follow the fluctuation of the water content spacially. The purpose of our paper is to demonstrate that electromagnetic induction techniques can be used also to determine the global soil water content and the soil moisture profile of any point in an area of several hectares. An application was made in Lebanon, on fersiallitic lixiviated soils, commonly found in all Mediterranean regions. Other possible applications could be calibration of remote sensing data, location of optimum planting places in watershed, rehabilitation of dry areas, and determination of ETR in small catchments.

## KEYWORDS

Soil Moisture- Electromagnetic induction- ETR

## INTRODUCTION

The measurement of the soil water content in the field has always been a tedious and uncertain task. Soil destructive techniques can be used to give an idea of the spatial variation of soil moisture only if one accepts to collect a great number of samples (Bardossy and al., 1998). For similar reasons, the use of probes access tubes, in the case of neutron probes, or probes left permanently in situ, as TDR or capacitances, is also limited (Chanzy and al., 1998). Therefore no really practical method is actually available to measure the global water content of the soils of water catchments despite the increasing need for such data, in remote sensing for instance.

## OBJECTIVES

Our present objective is to demonstrate that it is possible to determine with a reasonable accuracy the total water content of important volumes of soils and to develop an easy-to-use method. The ultimate goal is to make possible the estimation of the actual evapotranspiration of deep soils to facilitate the calculation of the water balance of small catchments, up to 500 hectares of area and, for shallow soils, the calibration of remote sensing imagery.

## THEORETICAL BASIS

The proposed method is based on the use of the Electromagnetic Induction (EI), which measures the electromagnetic conductivity of the soil. This technique has been used to determine soil salinity with indirect calibration (De Jong et al. 1979 ; Corwin and Rhoades, 1990), or with direct calibration (Job et al., 1988). The effect of soil moisture has been demonstrated on saline soils (Job et al, 1999). Going beyond this last experiment, in the present study, we assume that for negligible soil salinity, the global apparent electromagnetic conductivity is proportional to soil moisture

### Principle of electromagnetic induction

A transmitter coil (Tx), energized with a frequency  $f$  is placed on the soil surface. A receiver coil Rx is placed at a short distance  $s$ . The time varying primary magnetic field  $H_p$  produced by the alternating current

induces very small currents in the soil generating a secondary magnetic field  $H_s$  which is measured through the receiving coil. If the distance of attenuation of the primary field divided by the intercoil spacing is much smaller than unity, conditions known as « low induction number », then the conductivity of the soil is proportional to the ratio of primary to secondary field (McNeal, 1980) :

$$\sigma_a = k \cdot s^{-2} (H_s/H_p) \quad (1)$$

The measured conductivity is called apparent global conductivity, because it integrates the electrical conductivity of a variable volume of soil and its interstitial liquid. It is noted  $\sigma_a$ , and  $k$  is a constant parameter depending on instrument construction (frequency, intercoil spacing).

The depth of soil which contributes to 90% of the secondary field, taken as depth of penetration, is approximatively equal to two intercoil spacings if the soil is homogeneous and isotrope (fig.1). The contribution of a soil layer to the secondary field  $H_s$  depends on the position of the coils. In the instrument used in this paper (EM-38 Geonics), the central axis of symmetry of Tx and Rx coils are parallel and may be held either perpendicular to the soil (position said vertical mode, noted  $EMC_V$ ) or parallel to it (position said horizontal mode, noted  $EMC_H$ ).

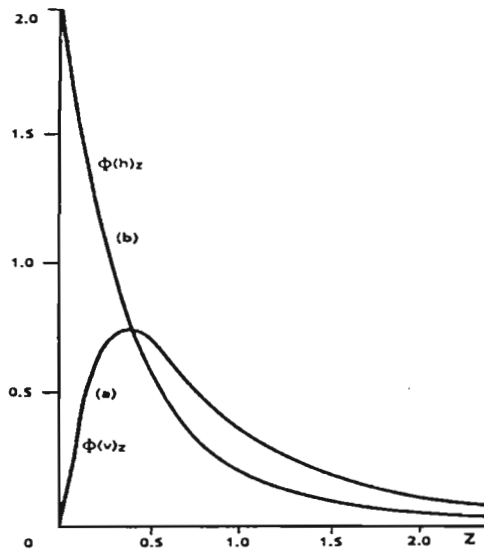


Fig. 1- Contribution of a soil layer at a normalized depth  $z$  to  $H_s$ , in vertical and horizontal mode respectively (from McNeal, 1980).

## METHOD

### Practical sampling

The reference points used in calibration, were collected in the field using the following procedure : each point of measurement  $J$  was taken as center of a circle of 5 meter diameter, inside which ten measurements of both  $EMC_V$  and  $EMC_H$  were taken at soil surface.

In the center of the circle, the soil was sampled with an auger at an increment of 20 cm, down to  $p$  cm depth. For each sample of soil, temperature was measured during sampling. Soil moisture was determined later on in laboratory. Integrated soil temperature and soil moisture were calculated for each point as :

$$T_{0-p} = p/20(T_{0-20} + T_{20-40} + \dots T_{(p-20)-p}) \quad (2)$$

$$\theta_{0-p} = 1/6(\theta_{0-20} + \theta_{20-40} + \dots \theta_{(p-20)-p}) \quad (3)$$

Soil apparent density was determined on a separate survey on three representative profiles in order to express data of soil moisture on volume basis. Soil salinity measured at random on ten profiles averaged  $0.15 \text{ dSm}^{-1}$  with a standard deviation of 0.03, justifying the assumption of absence of soil salinity.

The specific apparent electromagnetic conductivity of the soil material, free of water, but depending on temperature, was measured simultaneously above a rock of two cubic meters and values reported as :  $EMC_{Vj0}$  and  $EMC_{Hj0}$ . It was assumed that rock temperature was equal to soil temperature at a given time.

Apparent electromagnetic conductivity of each point J ( $\text{mSm}^{-1}$ ) was reported as :

$$\sigma_{vj} = (1/10 \sum EMC_{vi}) + EMC_{vj0} \quad (4)$$

for measurement in vertical mode, and :

$$\sigma_{Hj} = (1/10 \sum EMC_{Hi}) + EMC_{Hj0} \quad (5)$$

for measurement in horizontal mode mode. In both cases,  $i$  varies from 1 to 10.

Equations (4) and (5) mean that  $\sigma_{Hj}$  or  $\sigma_{vj}$  are equal to global apparent conductivity of the moist soil alone plus the global apparent conductivity of the soil material (i.e the dry soil).

The second term of these equations includes temperature variation, which cannot be measured in moist soil, because moisture and temperature are not independent variables. According to fig.1, the relative contribution of a given volume of soil being different in horizontal mode and in vertical mode,  $\sigma_{vj}$  is usually different from  $\sigma_{Hj}$ .

### Experimental site

An experimental site representative of mediterranean soil was selected in Lebanon, in the Beqaa valley, near Aamq. The site is situated in the lower part of a fan at the foot of Jebel Barouk, southern part of the Lebanon Mountain. The upper part of the fan is stony and as the altitude decreases, the depth of soil increases from zero to several meters at the center of the Beqaa Valley. The sequence of the soils is : rendzin - fersiallitic lixiviated - fersiallitic hydromorphic, (Lamoureux, 1976). No soil deeper than 120 cm could be investigated because the water table.

Soils were sampled as described above during a six month period, starting just after the winter. Sampling was resumed in june, the soil becoming too dry to make hand-sampling with auger easy.

### Calibration of soil moisture

Calibration was made bearing in mind two constraints :

Initially, in order to measure soil moisture variation over the widest range, it was necessary to make measurement from january to june. Over this period, average soil temperature varies from  $10^{\circ}\text{C}$  up to  $25^{\circ}\text{C}$ , meanwhile soil moisture, measured on volume basis, decreases from 0.39 (field capacity) down to 0.20 (permanent wilting point).

Secondly, in order to apply our results to soils of small catchments in which the depth of soils varies, two depth of soils were investigated : 60 cm and 120 cm. Two sets of 23 and 27 points were used to establish the regression equations:

$$\theta_{0-60} = f(\sigma_{vj}) \text{ and } \theta_{0-60} = f'(\sigma_{Hj}) \quad (6)$$

$$\text{and also: } \theta_{0-120} = f(\sigma_{vj}) \text{ and } \theta_{0-120} = f'(\sigma_{Hj}) \quad (7)$$

which concern soils of 120 and 60 cm depth respectively.

Two other sets of six points were sampled at random in the field in order to check the accuracy of the method.



## RESULTS AND DISCUSSION

### Effect of soil moisture on global apparent conductivity

The following regressions equations were found. In these equations, DW, stands for Durban-Watson coefficient which must be greater than 1.4 and smaller than 2.0 for indicating an homogeneous distribution of residuals with a degree of freedom  $n = 23$  :

$$\theta_{0-120} = 0.6 \cdot \sigma_v + 8.9 \quad r = 0.932 \quad DW = 1.7 \quad (8)$$

$$\theta_{0-120} = 0.5 \cdot \sigma_H + 14.7 \quad r = 0.953 \quad DW = 1.5 \quad (9)$$

$$\theta_{0-120} = 0.21 \cdot \sigma_v + 0.33 \cdot \sigma_H + 12.26 \quad r = 0.912 \quad DW = 1.4 \quad (10)$$

And, for shallow soils, with a degree of freedom  $n = 27$  :

$$\theta_{0-60} = 0.74 \cdot \sigma_v + 3.1 \quad r = 0.821 \quad DW = 1.0 \quad (11)$$

$$\theta_{0-60} = 0.58 \cdot \sigma_H + 10.6 \quad r = 0.880 \quad DW = 1.4 \quad (12)$$

$$\theta_{0-60} = 0.41 \cdot \sigma_v + 0.29 \cdot \sigma_H + 5.8 \quad r = 0.912 \quad DW = 1.2 \quad (13)$$

The error ratio :  $[er = \text{average of absolute residual} / (\text{average } \theta)]$  of equation (8) to (13) was found in the range  $0.05 \pm 0.01$ .

Residuals were distributed stochastically in each case.

### Estimation of soil moisture profiles

Soil moisture profile may be calculated as :

$$\rho_{\theta,d} = \theta_{d-120} / \theta_{0-d} \quad (14)$$

where  $d$  is a depth located around 50 cm, i.e. at half distance between soil surface and water table depth.  $\rho_{\theta,d}$  represents the water dynamic in the soil. Just after the first rains  $\rho_{\theta} < 1$ , then when soil is at field capacity,  $\rho_{\theta} \approx 1$ , and later on, while drying either by evaporation or internal drainage,  $\rho_{\theta} > 1$ .

From fig.1 it can be inferred that  $\rho_{\theta,d}$  varies as  $\sigma_v / \sigma_H$  because  $\sigma_H$  emphasis the contribution of the 0-50 cm layer of soil, while in the meantime,  $\sigma_v$  is equally influenced by the 0-50cm and the 50- $\infty$  layers.

This assumption was checked on the 23 soil profiles collected for soil moisture calibration.

The regression  $\rho_{\theta,d} = f(\theta_{d-120} / \theta_{0-d})$  was optimized. The best fit was achieved for  $p = 55$  cm for which :

$$\rho_{\theta,55} = 0.36 \cdot \sigma_v / \sigma_H + 0.7 \quad n = 23 \quad r = 0.708 \quad (15)$$

### Accuracy of the method

Multiple regression equations combining  $\sigma_v$  and  $\sigma_H$  were tested for each soil depth on the two sets of soils profiles. The error between estimated moisture ( $\theta_{es}$ ) and moisture measured in laboratory ( $\theta_{me}$ ) was calculated on six soil profiles randomly distributed on similar soils of the site :

$$er = | \theta_{es} - \theta_{me} | / \theta_{me} \quad (16)$$

The error for shallow soils ( $p=60$  cm) was :  $er = 0.06 \pm 0.02$ .

It was slightly greater for deeper soils ( $p=120$  cm) :  $0.08 \pm 0.04$ .

## APPLICATIONS

### Evolution of global soil moisture

Global soil moisture of a 2.4 ha portion of the lower part of the fan was surveyed in march 2000, when the soil moisture was near the field capacity using a 10m x10m grid. The survey was repeated in june of the same year (fig.2). During this period, the maximum soil moisture decreased from 0.36 down to 0.16, value close to the permanent wilting point of these soils.

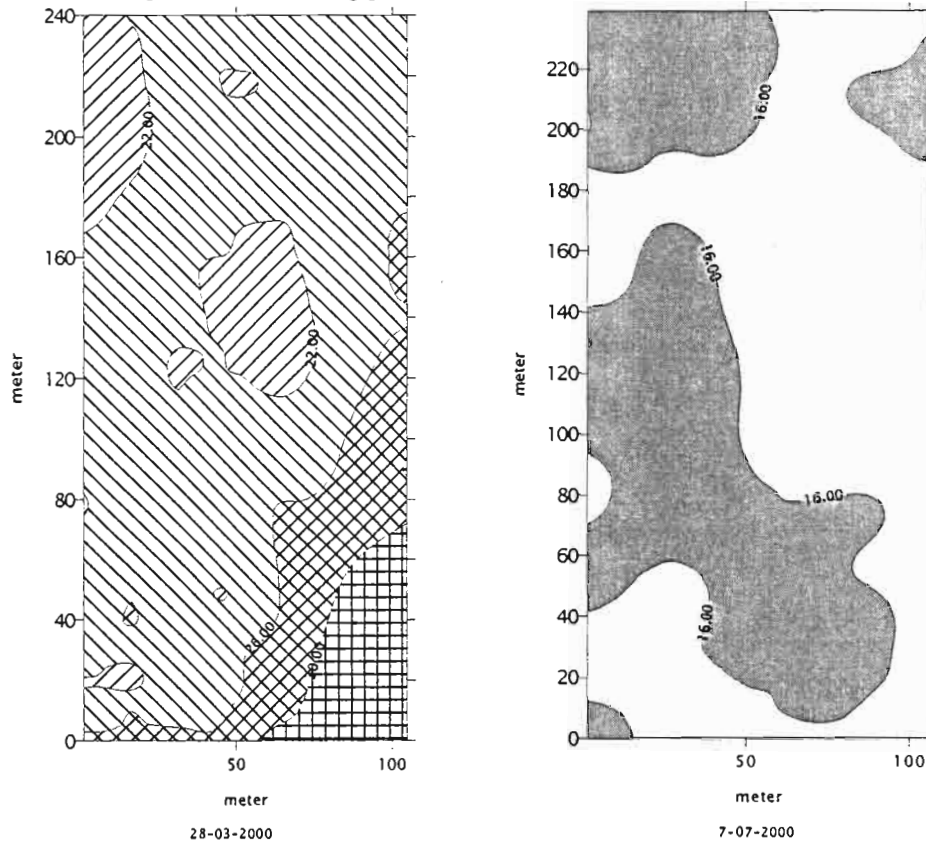


Fig.2- Evolution of global moisture of a red mediterranean soil of 120 cm depth, between march and june 2000. Isolines are reported as  $100 \cdot \theta_{es}$  using equation (9).

### Evolution of soil moisture profile

Soil moisture profiles were calculated on the same experimental plot, using the same field data set and calculating by equation (15). As shown figure 3 (left part), in march, just after the rainy season, soil moisture is evenly distributed along the depth of the profile :

$$\rho_{\theta,55} = \theta_{55-120} / \theta_{00-55} \text{ lies between } 1.0 \text{ and } 1.1$$

After two month and a half of evaporation and internal drainage, soil moisture of the upper 55 cm decreased drastically. As a consequence, soil moisture below the first 55 cm of soil becomes 1.8 times greater than the soil moisture of the upper 55 cm (fig.3, right part). This is true at least for 60% of the volume of the plot. Within this area, no moisture is available any more for plants having a root system reaching only the first 55 cm of soil.

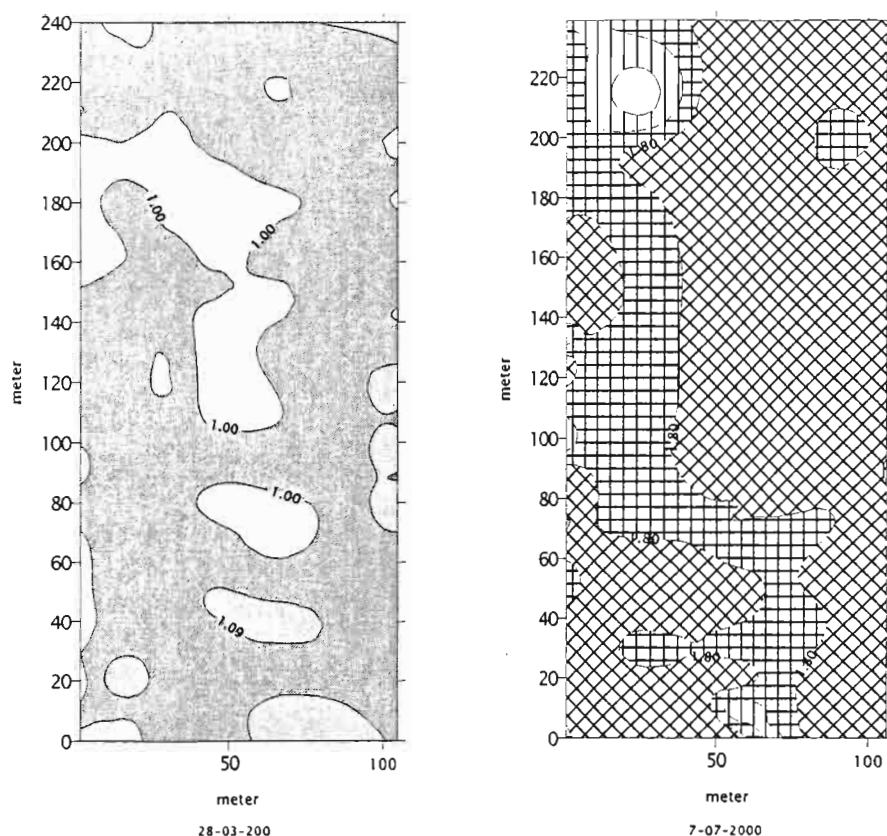


Fig.3- Evolution of soil moisture profile of a red mediterranean soil of 120 cm depth, between march and june 2000. Isolines are reported as  $\rho\theta_{55}$  using equation (15). The part of the plot for which  $\rho\theta_{55} > 1.8$  is drawn with grey colour. At the top left part of the experimental plot in june the white part indicates part of the plot which has been disturbed.

## CONCLUSIONS

We have demonstrated that electromagnetic induction can be used in precise evaluation of soil moisture for depth varying from 0 to 1.2 m. Monitoring in space and in time of the soil moisture of plots larger than 2 ha is possible providing a proper calibration of the soil response. The accuracy of the method is better than 8%.

Using the same data collected in the field, it is possible to give a spatial representation of a simplified soil moisture profile (ratio of soil moisture between 0 and 55 cm and 55-120 cm).

These two possibilities provide useful static and dynamic information on soil water at the scale of small watershed. They open the way to field calibration of remote sensing radar data on one hand and on techniques of optimisation of water distribution in the soil in another hand. In dry farming areas, as well as in irrigated ones, it is also useful to follow the spatial and time variation of soil moisture profile which can be easily deduced from electromagnetic induction measurement.

## REFERENCES

- BARDOSSY A., LEHMAN W.,1998- Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part1: geostatistical analysis. Journal of Hydrology, 206, p:1-15.
- CHANZY A., CHADOEUF J., GAUDU J.C., MOHRATH D., RICHARD G., BRUCKLER L.,1998- Soil Moisture monitoring at the field scale using automatic capacitance probes. European Journal of Soil Science, vol.49, p : 637-648.
- CORWIN D.L., RHOADES J.D., 1990- Measurements of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. Soil Science Society of America Journal, Vol.48, p: 288-291.

- DE JONC E., BALLANTYNE A.K., CAMERON D.R., READ D.W., 1979- Measurement of apparent electrical conductivity of soils by an electromagnetic probe to aid in salinity survey. *Soil Sci., Soc., Amer. J.*, vol.43, p: 810-812.
- JOB J.O. , LOYER J.Y., AILOUL M., 1988- Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cahiers ORSTOM, Série pédologie*, Vol.23., n°2., p: 123-131.
- JOB J.O., GONZALEZ BARRIOS J.L., RIVERA GONZALEZ M., 1999- Effect of soil moisture on the determination of soil salinity using electromagnetic induction. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 3, n°3, p:187-200.
- LAMOUROUX M., 1972- Etude des sols formés sur roches carbonatées. Pédogénèse fersialitique au Liban. Thèse de Doc. Université de Strasbourg, Mémoires Orstom, n° 56, 266 p.
- MCNEILL J.D., 1980- Electrical conductivity of soils and rocks. Technical note n°TN-5, Geonics Ltd, Canada.



# UN MODELE D'EXPLORATION DES DYNAMIQUES RESSOURCE-USAGES POUR LA GESTION INTEGREE D'UNE NAPPE SUREXPLOITEE. APPLICATION A LA NAPPE DE KAIROUAN, TUNISIE

Feuillette S.\*, Garin P.\*\*, Le Goulven P.\*\*\*, Bousquet F.\*\*\*\*

\*I RD, Laboratoire d'Informatique Appliquée, 32 av Varagnat, 34090, Bondy

\*\* Cemagref, UR Irrigation BP 5095 361, rue JF Breton 34033 Montpellier cedex 1

\*\*\* IRD, Mission en Tunisie, BP434, 1004 Tunis El Menzah IV, Tunisie

\*\*\*\* Cirad Tera Ere, TA 60/15, 73 Avenue Jean-François Breton, 34398 Montpellier Cedex 5

## RESUME

L'objectif de ce papier est de montrer l'intérêt d'une modélisation multi-agents pour explorer la gestion des nappes surexploitées, par une maîtrise de la demande. L'étude se base sur le cas de la nappe de Kairouan, en Tunisie Centrale. Considérée comme nécessaire dans un contexte de déséquilibre offre/demande, lorsque le développement de l'offre atteint ses limites, la gestion de la demande peut être mise en œuvre grâce à plusieurs types d'outils, plus ou moins efficaces selon le contexte de l'intervention. La modélisation des interactions entre nappe et usages permet d'étudier les effets de ces interventions. Les Systèmes Multi-Agents, particulièrement adaptés à la représentation des interactions entre ressources et sociétés, nous ont permis de construire le modèle cognitif SINUSE (Simulations des Interactions entre Nappe et Usages de l'Eau) pour formaliser le système complexe constitué par l'ensemble nappe de Kairouan/usagers, explorer les liens entre ressource et usages à travers des simulations et étudier les tendances d'évolution du système sous diverses contraintes d'interventions.

## INTRODUCTION

L'évolution des prélèvements en eau dans toutes les sociétés montre les mêmes tendances jusqu'à un niveau avancé de développement économique : les effets de l'élévation du niveau de vie et de la population se conjuguent pour accroître les besoins en eau pour tous les usages (FAO, 1993).

La première réponse à cette pression sur les ressources a été, dans la plupart des pays, une politique d'équipement destinée à accroître l'offre utilisable. Cette politique a été particulièrement volontariste ces dernières décennies dans les pays semi-arides méditerranéens, caractérisés par des écoulements violents et intermittents, donc peu utilisables sans aménagement. Cette phase d'aménagement en voie d'achèvement, l'accroissement de l'eau disponible repose désormais d'une part sur le traitement des eaux non conventionnelles, ce qui peut résoudre des contraintes locales mais contribue rarement à une augmentation significative de l'offre à l'échelle nationale compte tenu de son coût élevé, et d'autre part sur l'approfondissement des forages, rendant exploitables les nappes les plus profondes. Cette stratégie atteint ses limites dans de nombreuses régions où les prélèvements, augmentant toujours, finissent par dépasser l'offre renouvelable annuellement, entraînant une baisse continue des aquifères. Comparant alors les stratégies de plusieurs pays semi-arides confrontés à ce risque de développement non durable<sup>1</sup>, Allan et Karshenas (1996) ont montré comment certains ont évité la catastrophe écologique annoncée, en instaurant une politique capable de maîtriser puis de réduire la demande en eau, essentiellement dans le secteur agricole. La Tunisie, comme d'autres pays méditerranéens, connaît déjà des déséquilibres locaux entre offre en eau et demande et affiche sa volonté de maîtriser la demande en eau (Horchani, 1995).

Nous commencerons par présenter succinctement les principales mesures des politiques de "gestion de la demande" et les contraintes de leur application dans le cas des nappes. Nous détaillerons particulièrement les enjeux de la gestion de la nappe de Kairouan en Tunisie, dont l'évolution est une bonne illustration des difficultés d'instauration d'une gestion durable reposant sur une maîtrise de la demande des différents usages.

Le passage d'une politique de l'offre à une gestion de la demande n'est pas un processus trivial. Si de nombreux pays hésitent à suivre cette voie, c'est en partie parce que les mesures préconisées ont un coût

---

<sup>1</sup> au sens où elle ne répond pas "aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins" (rapport Brundtland 1998 sur le développement durable)

politique et social élevé (Turton, 1999). **Bien connaître les termes d'élaboration de la demande en relation avec les conditions d'accès à la ressource au niveau local relève donc d'un intérêt majeur pour les régions qui cherchent à identifier les modalités de gestion de la demande les plus acceptables économiquement et socialement.** Le modèle SINUSE (Simulation des Interaction entre Nappe et Usages de l'Eau), présenté dans un deuxième temps, a pour vocation d'être un outil d'analyse prospective et de dialogue entre des représentants de différentes parties prenantes de la gestion de l'eau d'une nappe comme celle de Kairouan.

## LA GESTION DE LA DEMANDE SUR LA NAPPE DE KAIROUAN

### Les instruments de gestion de la demande et leur applicabilité au cas des nappes

Les mesures permettant d'interférer avec le comportement des usagers – donc sur leur demande – sont de natures très variées et ont donné lieu à de nombreuses classifications. Celle qui suit s'inspire de Montginoul (1997) :

*Les interventions techniques* sont destinées à améliorer l'efficacité de l'eau pour un usage donné. En agriculture, le remplacement des techniques traditionnelles d'irrigation de surface par des équipements modernes et les conseils au pilotage de l'irrigation bénéficient de soutiens publics importants et d'un large consensus politique, mais il en résulte rarement une baisse de la demande agricole, car rien n'empêche les agriculteurs de valoriser ces économies d'eau par unité de surface en augmentant leur superficie irriguée. Ce risque d'expansion est très présent sur les nappes, où les superficies sont contraintes d'abord par le débit nécessaire par hectare, pour une capacité de pompage donné.

*Les réformes des droits d'accès et des réglementations* sur les usages répondent souvent à des situations de crise nécessitant une limitation rapide d'un usage. L'accès à l'eau de nappe est ainsi fréquemment soumis à autorisation et limitations (profondeur, débit maximum). Le manque d'implication des acteurs locaux dans le choix de ces mesures fragilise leur acceptabilité sociale et elles sont d'autant plus vite contournées que les moyens de contrôle de leur application sont souvent défaillants. Ce constat vaut particulièrement pour les nappes, caractérisées par une multitude de points de prélèvements disséminés sur un territoire aux frontières floues, une absence de consensus social sur le caractère de bien commun de la ressource en eau et une vision très partielle et locale des « préleveurs » sur le fonctionnement de l'aquifère.

Les principaux *instruments économiques* sont la tarification et les marchés de l'eau. L'attribution d'un prix pour l'eau, censé refléter sa rareté, est réputée orienter le comportement des usagers dans deux voies (1) donner la priorité aux activités qui valorisent le mieux l'eau (2) optimiser la quantité d'eau accordée à chaque activité. Cependant une maîtrise de la demande par ces outils implique :

- (I) une sensibilité de la demande au prix, c'est à dire que les usages consommant beaucoup d'eau mais la valorisant peu soient dominants (par exemple les cultures de céréales) ;
- (II) une diversité des usages possibles, afin que les usagers puissent s'orienter vers des cultures valorisant mieux l'eau, parce qu'elles en demandent peu (ex : irrigation d'appoint des cultures sèches), ou parce qu'elles génèrent des revenus importants (ex : cultures légumières) ;
- (III) que le bien à la base de la tarification ou du marché soit effectivement l'eau avec des caractéristiques quantitatives (volumes ou débits) contrôlables et non des éléments connexes (ex : la superficie irrigable, la durée de l'irrigation ou le droit de prélever sans limitation).

Si (I) et (II) ne sont pas respectés, les instruments économiques provoquent une simple réduction du revenu des usagers et une sélection de ceux qui ont les moyens de la supporter. Sans (III), le prix ne reflète pas la rareté relative de l'eau. Dans le cas des nappes, c'est surtout la troisième condition qui pose problème, faute de moyens de contrôle et surtout d'acceptabilité du contrôle, et d'un prix qui ne se réduise pas aux frais d'exhaure, généralement assumés directement par "l'utilisateur-préleveur". Des marchés de l'eau en fonctionnement sur des nappes ont déjà été observés (Palmer-Jones, 1997). Mais ils sont limités au réseau social du propriétaire du puits, la confiance mutuelle autorisant des échanges sur un bien caractérisé de manière peu formelle (Strosser, 1997) ; de plus le prix de l'eau correspond seulement au coût d'exhaure *et non à la valeur de la ressource pour la collectivité*. Ces "marchés" s'apparentent donc plutôt à un partage temporaire des points d'accès à l'eau.

Les *outils contractuels* consistent à formaliser l'engagement d'un individu (ou d'un groupe) vis à vis d'une structure qui a reçu mandat de gérer la ressource. Dans le contrat sont combinés en général les trois types d'instruments précédents. Le quota d'eau est à la base de nombreux contrats. Il correspond à la répartition de la pénurie d'eau à travers la définition de volumes maximaux accordés, assortis parfois de débit maximal et d'une tarification par pallier, pour couvrir simplement les coûts de gestion pour ceux qui respectent la dotation et dissuasive pour ceux qui la dépassent. Ces contrats négociés sont de plus en plus utilisés pour gérer les nappes en France (ex : nappe de Beauce). Leurs limites sont 1) de dépendre des rapports de force entre acteurs dans la négociation, 2) de ne pas inciter à des économies d'eau en deçà du quota alloué pour chaque usage. Ces outils sont également tributaires de l'acceptabilité sociale de tous les termes du contrat, y compris le contrôle et les pénalités, et nécessitent aussi des moyens de comptage appropriés.

Les nappes se prêtent donc difficilement à ces modalités de gestion de la demande, car historiquement leur utilisation s'est développée dans un contexte d'accès libre *de facto*. Les usagers contournent les réglementations que les pouvoirs publics n'ont pas fait respecter, et leur méconnaissance du fonctionnement complexe d'aquifères invisibles depuis la surface ne favorise pas l'émergence d'une conscience collective des caractères commun et fini de ce bien. *Or ce dernier point est essentiel à l'acceptabilité sociale des mesures de gestion de la demande.*

### Cas de la nappe de Kairouan

La nappe de Kairouan, qui constitue la ressource en eau souterraine la plus importante de Tunisie Centrale, subit un rabattement continu depuis une vingtaine d'années. L'abaissement se fait ressentir sur l'ensemble de la zone et s'est accru ces dernières années (cf fig. 4). Ce rabattement semble peu inquiétant étant donnée l'importance de la réserve<sup>2</sup> (Mansouri, 1996) ; cependant l'écart entre apports et prélèvements se creuse, engendrant des risques d'ordres quantitatif, notamment une **augmentation non négligeable des coûts d'accès** à la ressource et une mise en **péril de la viabilité des ouvrages d'accès existant** (y compris les forages publics et privés) ; et qualitatif (un **risque de contamination des nappes profondes par les eaux de l'aval**, dont la salinité est élevée (Besbes, 1975)).

Les prélèvements sont destinés à l'irrigation à hauteur de 80 %. Les agriculteurs irriguants reçoivent l'eau soit dans des périmètres d'irrigation desservis par forages collectifs, soit par des puits individuels. Ces derniers sont les plus gros préleveurs au total et demeurent pourtant très mal connus. En dehors des périmètres collectifs irrigués, où l'eau est payée au gestionnaire (sans toutefois couvrir ses coûts), les agriculteurs ne payent que leurs propres coûts d'investissement et d'exhaure, ce qui rend difficile l'instauration d'un prix de l'eau pour gérer la demande. Pour tenter d'enrayer la surexploitation, les autorités sont d'abord intervenues sur l'offre à travers la gestion des barrages qui stockent les écoulements des oueds alimentant le système, puis sur la demande, en instaurant une "zone de sauvegarde" censée contraindre la construction de nouveaux captages, depuis 1991. Mais dans les faits, la nappe de Kairouan demeure une ressource collective en accès libre : la réglementation restrictive n'est pas respectée et les puits continuent de proliférer (cf fig. 2). L'outil réglementaire est d'autant plus difficile à appliquer que la police des eaux est assurée par l'institution chargée du développement régional (Feuillette *et al.*, 1998). Les autorités s'interrogent donc sur les outils de gestion de la demande efficaces -donc acceptés par les usagers-pour enrayer la surexploitation. D'où l'intérêt d'une étude approfondie de la demande.

Notre étude a porté sur la zone la plus exploitée de la nappe : les puits, les périmètres collectifs et les forages destinés à l'eau potable y sont particulièrement nombreux ; la majorité des apports y est contrôlée par le barrage El Haouareb, mis en eau en 1990. Les graphes suivants représentent l'évolution des principaux paramètres d'état du système.

---

<sup>2</sup> L'aquifère s'étend sur environ 3000 km<sup>2</sup> et sa profondeur atteint 700 m par endroits ; la nappe affleure en aval



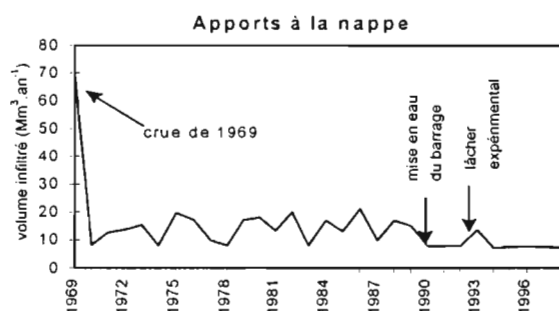


Fig.1 : Baisse des apports à la zone d'étude.  
Source : Nazoumou (1996)

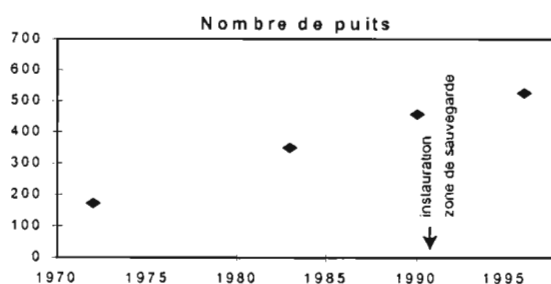


Fig.2 : Augmentation du nombre de puits dans la zone d'étude. Sources : CRDA<sup>3</sup> de Kairouan, nos enquêtes

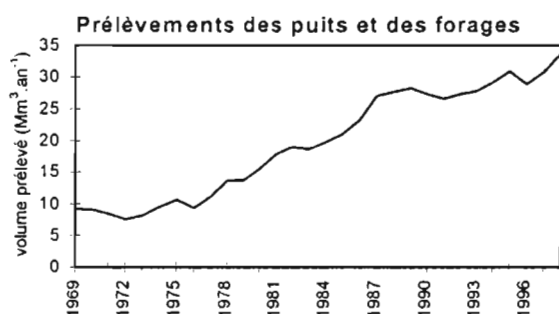


Fig.3 : Augmentation des prélèvements dans la zone d'étude. Sources : DGRE<sup>4</sup>, nos enquêtes

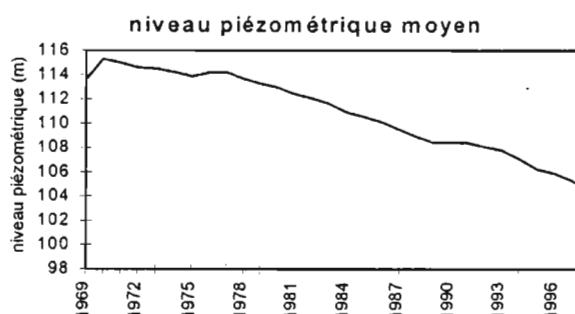


Fig.4 : Baisse du niveau piézométrique moyen dans la zone. Source : sorties moyennées du modèle de la nappe de Kairouan (Nazoumou and Besbes, 2001)

Comme le montrent les figures 1 à 4, la surexploitation se poursuit ; les faibles apports au barrage et son mode de gestion ne permettent pas de compenser le déséquilibre apports/prélèvements par l'offre, et la nappe s'abaisse.

Notre recherche de terrain sur les usagers de la nappe de Kairouan a montré que :

- les interactions entre puits ne sont pas ressenties localement, du fait de la forte transmissivité de l'aquifère ; par contre tous les irriguants sur puits ressentent l'abaissement global de la nappe ;
- les agriculteurs perçoivent peu le caractère commun de la ressource qu'ils exploitent (imaginée comme une multitude d'"oueds souterrains") et sont réticents à payer l'eau (l'eau est un "don de Dieu") ;
- le rabattement affecte peu les stratégies d'assolement et de construction des puits pour le moment ;
- les stratégies d'usages et de construction des puits sont fortement influencées par plusieurs types de paramètres locaux : le parcellaire de l'agriculteur (taille et possibilité de regroupement des parcelles), son emplacement sur la nappe (profondeur de l'eau), et ses interactions avec les agriculteurs voisins.

Les interactions entre agriculteurs, sur lesquelles s'est focalisée notre étude, sont de plusieurs ordres :

- possibilité de s'associer entre voisins pour construire un puits ;
- influence du voisinage sur les décisions d'investissement (présence de puits indiquant l'accessibilité de la nappe, importance de l'image sociale, ou présence de puits abandonnés décourageant l'investissement) ;
- influence des échanges fonciers en faire valoir indirect sur les prélèvements d'eau et les décisions d'investissement.

<sup>3</sup> Commissariat Régional de Développement Agricole

<sup>4</sup> Direction Générale des Ressources en Eau

La modélisation du système doit permettre d'explorer ses tendances d'évolution et de simuler des scénarios d'intervention. Quel type de modélisation adopter pour tenir compte des difficultés de gestion inhérentes aux nappes et des spécificités du système étudié ?

### Intérêts des Systèmes Multi-Agents pour modéliser le système

La recherche propose divers outils d'étude de la gestion d'une ressource collective : depuis les modèles de fonctionnement de la ressource qui considèrent la demande comme un paramètre exogène jusqu'aux modèles économiques focalisés sur la demande qui prennent l'offre en eau comme une donnée de l'environnement du système, en passant par les modèles mixtes dans lesquels ressource et usages sont en interaction. Dans notre cas, le modèle devait non seulement représenter ces interactions offre/demande, mais aussi les stratégies d'investissement des agriculteurs (l'accroissement des prélèvements provenant pour une large part de l'apparition des puits), et les interactions entre agriculteurs (du fait de leur impact sur la demande en eau). Or les modèles classiques de fonctionnement de la demande en eau agricole (modèles agro-économiques ou modèles d'action à l'échelle des exploitations, modèles d'activité de type GAMS<sup>5</sup> à l'échelle de la région) ne représentent que les décisions tactiques d'irrigation ou les stratégies d'assolement des agriculteurs (processus intra-annuels), et limitent les interactions entre agriculteurs - lorsqu'elles sont représentées - à des échanges marchands ou aux interactions indirectes ressenties *via* la ressource. De plus ils représentent rarement les processus régissant l'offre et la demande conjointement, ce qui est pourtant nécessaire à la prise en compte de leurs liens dynamiques.

Les Systèmes Multi-Agents (SMA) issus de l'Intelligence Artificielle Distribuée et basés sur le principe de la distribution des interactions (Ferber, 1995) sont au contraire tout à fait adaptés à la représentation des interactions ressources/sociétés et permettent de tenir compte des comportements dans leur diversité. Le modélisateur peut manipuler et incorporer dans un même SMA des entités spatiales définies à des niveaux hiérarchiques différents, et faire jouer des agents, entités informatiques autonomes, capables d'agir localement en réponse à des stimuli de l'environnement ou à leurs communications avec d'autres agents. Les interactions entre agents peuvent avoir lieu *via* l'environnement (par encombrement spatial ou baisse d'une ressource) ou explicitement, par échanges de messages ou transactions. Ces caractéristiques nous ont paru particulièrement adaptées à la représentation du système étudié. Nous avons construit le modèle SINUSE (Simulations des Interactions entre Nappe et Usages de l'Eau) en langage SMALLTALK, sur la plateforme de simulation multi-agents CORMAS (Common-pool Ressources and Multi-Agent Systems), spécialement conçue par (Bousquet *et al.*, 1998) pour la gestion des ressources renouvelables. SINUSE représente les interactions entre agriculteurs et nappe, aux échelles de temps saisonnières et interannuelles.

## PRESENTATION DU MODELE SINUSE

La zone d'étude s'étend sur environ 25 000 hectares. Le modèle SINUSE représente un schéma réduit du système étudié, tout en respectant les proportions des paramètres essentiels, afin de retrouver la cohérence des phénomènes observés sur le terrain. La définition de l'espace du modèle se fait sur une grille rectangulaire dont chaque cellule représente 1 hectare, la grille représentant 2 400 hectares au total. Pour une description détaillée de la démarche et du modèle, se référer à (Feuillette *et al.*, 2000).

### Hypothèses du modèle

L'hypothèse centrale du modèle SINUSE est l'importance des interactions entre les entités du système nappe-agriculteurs.

Le modèle SINUSE comporte trois types d'entités :

- **des entités sociales**, les exploitants, qui représentent les agriculteurs du terrain<sup>6</sup> ;
- **des entités spatiales** de niveaux d'aggrégation différents, comme les zones de la nappe, les parcelles, les périmètres collectifs d'irrigation ;

<sup>5</sup> General Algebraic Modeling System, modèle mathématique élaboré par la BIRD et très utilisé

<sup>6</sup> Nous avons choisi de centrer la partie usages du modèle sur le fonctionnement de la demande agricole, celle-ci étant majoritaire, non maîtrisée et mal connue

- **des entités passives** (et situées) comme les puits, qui apparaissent et disparaissent au cours de la simulation (construction et abandon).

Le pas de temps adopté pour la description des interactions entre ces entités est l'année, découpée en deux saisons de culture. Les décisions d'investissement s'opèrent à une échelle interannuelle. Les apports pluviométriques pour chaque type de culture reposent sur la chronique locale des 20 dernières années.

*Les exploitants* sont caractérisés par des attributs descriptifs de leur exploitation (parcelles, puits, surface...), de leur famille (nombre de membres familiaux, disponibles, revenus extra-agricoles...), de leur épargne, et prennent plusieurs types de décisions de manière à assurer le fonctionnement et la progression du système exploitation-famille :

- des **décisions d'assolement saisonnier** de leurs parcelles qui dépendent essentiellement du type de faire valoir, des contraintes d'accès à l'eau, de la taille de l'exploitation et de la parcelle, de leurs revenus<sup>7</sup>,
- des **décisions d'échanges fonciers annuels** en fonction de leur main d'œuvre, de leur accès à l'eau, de leur situation économique,
- des **décisions annuelles de diversification des revenus** en fonction de la main d'œuvre familiale disponible,
- des **décisions stratégiques de construction de puits** en fonction de contraintes parcellaires et économiques, avec la possibilité de s'associer à un voisin pour s'en affranchir,
- et des **décisions stratégiques de vente ou d'achat de terre**.

La descriptions des règles qui régissent ces comportements repose sur un important travail d'enquêtes sur le terrain (approfondies et statistiques).

*La ressource* est représentée par deux zones de paramètres hydrogéologiques différents, en interaction entre elles, et avec le reste de la nappe. Différentes zones de profondeur symbolisent le gradient croissant est-ouest observé dans la réalité. La géométrie lenticulaire de la nappe est prise en compte implicitement à travers la probabilité d'échec de la construction des puits. La représentation structurelle de la ressource est basée sur les diverses études menées sur la nappe (celles de Castany (1968), Besbes (1971), Besbes et de Marsily (1976) et Chaieb (1988)); tandis que son fonctionnement repose sur les données simplifiées du modèle de nappe conçu par Besbes (1975) et actuellement repris par Nazoumou (2001).

*Les parcelles* ont pour attributs leur taille, leur assolement, leur accès à l'eau. L'impact de leurs caractéristiques pédologiques est supposé marginal (sur la base de la bibliographie et des observations de terrain).

*Les périmètres collectifs* d'irrigation sont caractérisés par un prix de l'eau et une efficience de distribution. Leur fonctionnement interne est supposé homogène.

Les caractéristiques techniques des *puits* reposent sur des mesures et des enquêtes effectuées auprès d'entreprise de creusage et d'équipement, et des agriculteurs.

## Structure et fonctionnement du modèle

Le simulateur SINUSE est organisé en deux parties : le monde artificiel constitué des différents agents qui interagissent dans le temps et la structure de contrôle qui gère la simulation.

La figure 5 montre que les entités spatiales et sociales fonctionnent de manière autonome, chacune avec ses règles d'action, et interagissent entre elles.

---

<sup>7</sup> Un coefficient aléatoire sur l'espérance de produit brut des cultures maraîchères intègre les fluctuations des prix et le risque d'accident phyto-sanitaire ; le rendement des cultures en sec dépend de la pluviométrie ; les produits bruts des autres cultures sont fixés.

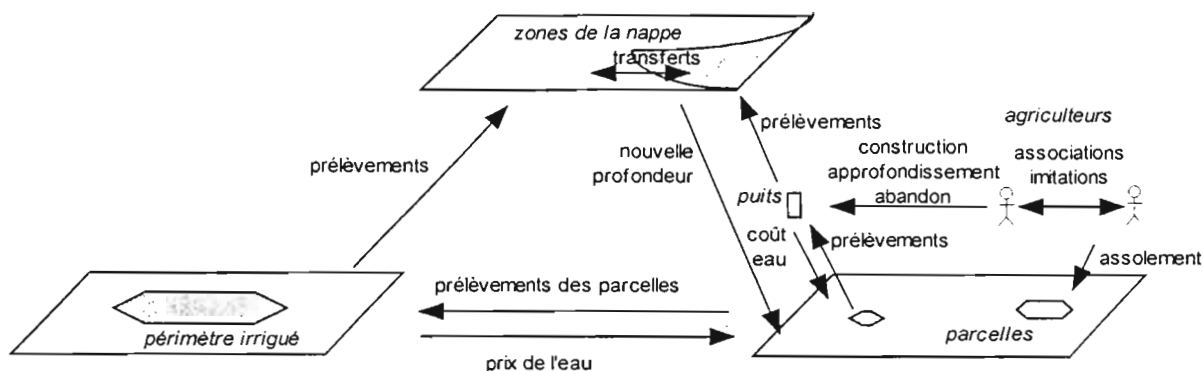


Fig.5: Les exploitants procèdent à des décisions tactiques (échanges fonciers, proportion de la sole cultivée). La composition de la sole irriguée entraîne un prélèvement au niveau des points d'eau qui le répercutent à la zone de la nappe à laquelle ils sont rattachés. Celle-ci réagit en s'abaissant, et le gradient piézométrique résultant entraîne des transferts de volume entre zones. Chaque ZoneNappe communique sa nouvelle profondeur aux parcelles ce qui donne lieu si nécessaire à un approfondissement des puits (quand le niveau d'endettement de l'exploitant le permet). Entre temps les résultats de chaque campagne agricole ont été calculés à partir du prix de l'eau. En fin d'année, selon sa trésorerie, son épargne et sa situation, l'agriculteur peut envisager la construction d'un puits, en essayant si besoin de s'associer avec un voisin, ou d'acheter ou de vendre une parcelle.

Les simulations sont lancées sur 15 pas de temps, des bouleversements techniques ou économiques ayant toute chance de survenir, et le système devenant sensible à certains processus non pris en compte (comme l'héritage) au-delà de cette période.

### Simulations d'interventions

Nous avons envisagé la simulation des interventions suivantes :

1. une gestion par la demande de type économique (paiement d'un prix au mètre cube via la facture d'électricité permise par une généralisation des pompes électrifiées) ;
2. une adoption généralisée de la micro-irrigation et de systèmes de culture majoritairement constitués d'oliveraies, qui pourraient être le résultat d'une coordination entre agriculteurs accompagnée d'incitations économiques de la part de l'Etat ;
3. la mise en place de quotas d'utilisation sur les volumes ou par une restriction de la surface irriguée compte tenu de l'assolement.

Les figures 6, 7 et 8 présentent les résultats de simulations de scénarios du type (1) : un scénario "prix élevé" (prix de l'eau fixé à 0,2<sup>8</sup> Dinars Tunisiens par mètre cube, soit environ), et un scénario "prix très élevé" (prix de l'eau fixé à 0,9 Dinars Tunisiens par mètre cube) sont comparés à un scénario "neutre" à travers une quinzaine de simulations chacun (pour tenir compte de la variabilité "intra-scénario"), sur 15 pas de temps, et à travers 3 indicateurs : le nombre de puits total, la profondeur moyenne de la nappe, et le nombre d'agriculteurs "satisfaits" (l'indicateur de satisfaction reposant sur une épargne et une trésorerie positives).

<sup>8</sup> Dans les périmètres collectifs le prix de l'eau au moment de notre étude était environ de 0,06 dinars tunisiens/mètre cube, et le coût d'accès à l'eau par un puits pour les agriculteurs privés était compris entre 0,04 et 0,1 dinars/mètre cube (sans compter l'amortissement des équipements)

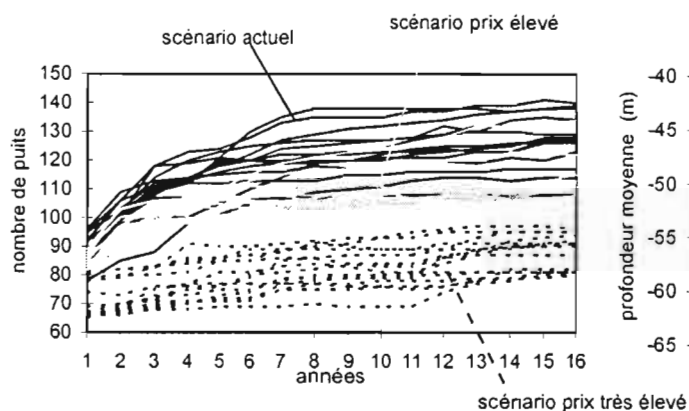


Fig.6 : Comparaison du nombre de puits entre le scénario actuel et 2 scénarios d'intervention par le prix

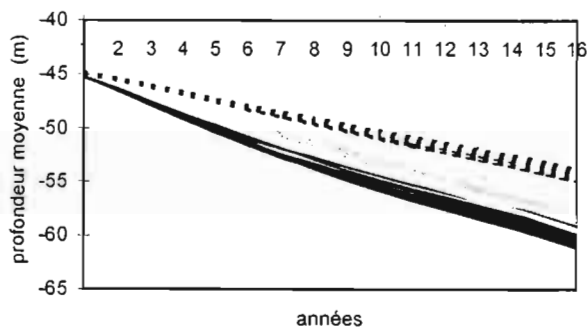


Fig.7 : Comparaison de la profondeur de nappe entre le scénario actuel et 2 scénarios d'intervention par le prix

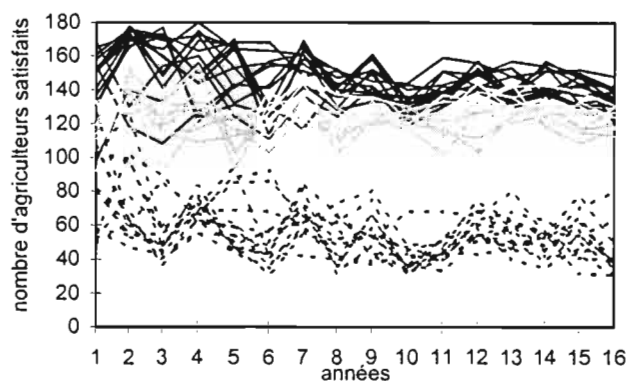


Fig.8 : Comparaison du nombre d'agriculteurs satisfaits entre le scénario actuel et 2 scénarios d'intervention par le prix

La variabilité des résultats pour un même scénario provient des paramètres stochastiques de la simulation<sup>9</sup> ; elle est acceptable relativement au grand nombre de phénomènes aléatoires dont les effets se cumulent au fil des simulations, notre objectif étant d'analyser des tendances d'évolution. Le scénario "prix très élevé" montre que, dans le contexte de nos hypothèses, un prix de l'eau fixé à 0,9 DT/m<sup>3</sup> a un effet significatif sur le nombre de puits construits et sur la baisse de la nappe sans toutefois permettre un retour à l'équilibre offre/demande. Toutefois ce scénario suppose l'instauration d'un prix de l'eau équivalent à 15 fois le prix de l'eau actuel dans les périmètres collectifs, considéré déjà non supportable pour certaines catégories d'agriculteurs<sup>10</sup>. La simulation d'un scénario d'intervention plus raisonnable reposant sur l'instauration d'un prix de l'eau de 0,2 DT/m<sup>3</sup> (soit plus de trois fois le prix actuel dans les périmètres publics) ne donne pas de résultats significativement différents du scénario neutre concernant l'abaissement de la nappe : le test de Wilcoxon Mann-Whitney effectué sur la moyenne des 5 derniers pas de temps montre que l'hypothèse  $H_0$  d'égalité des deux distributions est acceptée au seuil  $\alpha$  de 5% tandis qu'elle est rejetée au même seuil pour l'indicateur de satisfaction des agriculteurs (pour les puits elle est acceptée au seuil  $\alpha$  de 2%), ce qui signifie que les agriculteurs s'appauvrissent sans que pour autant la surexploitation de la nappe soit enrayerée.

Ce type de résultat, inhérent aux règles d'action des exploitants définies dans le modèle, mais difficilement prévisible en raison de la multitude et de la complexité des interactions caractérisant ce système, pose question sur l'acceptation sociale de l'instauration d'un prix de l'eau, intervention pourtant très souvent adoptée à des fins de maîtrise de la demande. La faible sensibilité du système au

<sup>9</sup> Par exemple la probabilité de prise de risque qui pousse les agriculteurs à construire un puits dans une zone sans puits, conduisant à l'apparition de fronts pionniers.

<sup>10</sup> sources : nos enquêtes et le travail de (Kefi, 1999)

prix de l'eau est finalement peu surprenante dans le contexte d'étude : climat semi-aride, importance économiques des cultures irriguées, manque d'alternatives (Montginoul, op. cité).

## CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le calage et la validation de ce type de modèle ne correspondent pas aux opérations classiquement décrites en modélisation mathématique, du fait du grand nombre de paramètres en jeu (Barreteau, 1998). La plupart des étapes de validation décrites par Rykiel (1996) (comparaison des sorties avec les données de terrain, cohérence de l'évolution globale du système, réaction à des situations extrêmes, cohérence des trajectoires individuelles, variabilité stochastique...) nous ont jusqu'alors permis d'accréditer le modèle SINUSE, compte tenu de notre objectif, sachant que valider revient à démontrer que le modèle fournit des résultats avec une précision suffisante dans son domaine d'application, par rapport aux intentions d'utilisation (Lewis, 1993).

En conclusion la modélisation du système par les SMA nous a pour l'instant conduit :

- à interroger efficacement nos données pour en faire émerger les variables et les comportements les plus importants relativement à la question posée ;
- **à mettre en évidence le lien entre une dynamique globale et une multitude d'actions et d'interactions individuelles ;**
- à formaliser un système extrêmement complexe, en respectant sa "structure objectale" et la variété de ses descripteurs (Ferrand et Deffuant, 1998).

En cela le modèle a constitué une aide considérable au traitement des données et à la compréhension du système.

Utilisé à des fins exploratoires par les chercheurs, il pourrait devenir le support de discussions entre acteurs et gestionnaires dans un objectif d'acceptabilité des mesures de contrôle de la demande. Ceci impliquerait de procéder à une validation du modèle par les acteurs, telle que celle expérimentée et décrite par Barreteau et Bousquet (1999).

## BIBLIOGRAPHIE

- ALLAN, J. A., et KARSHENAS, M. (1996). Managing Environmental Capital : the case of water in Israel, Jordan, the West bank and Gaza. 1947 to 1995. In "Water, Peace and the middle east : negociating resources in the Jordan basin" (A. J. A. e. C. J.H., ed.). I.B. taurus Publishers, London.
- BARRETEAU, O. (1998). Un Système Multi-Agents pour explorer la viabilité des systèmes irrigués : dynamique des interactions et mode d'organisation. Thèse de Doctorat, ENGREF, Montpellier.
- BARRETEAU, O., et BOUSQUET, F. (1999). Jeux de rôles et validation des systèmes multi-agents. In "Ingénierie des systèmes multi-agents" (M.-P. Gleizes and P. Marcenac, eds.), pp. 67-80. Hermès Sciences Publications, Paris.
- BESBES, M. (1971). "Note sur la géométrie du réservoir profond de la plaine de Kairouan," DRE, Tunis.
- BESBES, M. (1975). "Etude hydrogéologique de la plaine de Kairouan sur modèles mathématiques," DRE, Tunis.
- BESBES, M., et de MARSILY, G. (1976). L'analyse d'un grand réservoir aquifère en vue de sa modélisation. In "Conférence AIH - L'hydrologie des grands bassins sédimentaires", Budapest.
- BOUSQUET, F., BAKAM, I., PROTON, H., et LEPAGE, C. (1998). Cormas : common-pool resources and multi-agent systems. In "11th conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, Lecture Notes in Artificial Intelligence" (A. P. d. Pobil, J. Mira and M. Ali, eds.), Vol. 1416, pp. 826-837. Springer-Verlag, Barcelone.
- CASTANY, G. (1968). Aménagement des oueds Zeroud et Merguellil - Alimentation des nappes de la plaine de Kairouan par les eaux des oueds Merguellil et Zeroud. , pp. 15 p, Tunis.
- CHAJEB, H. (1988). "Contribution à la réactualisation des modèles hydrogéologiques," Faculté des Sciences, Tunis.
- FAO (1993). "The state of the world : water policies and agriculture," FAO, Rome, Italie.
- FERBER, J. (1995). "Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective," InterEditions.
- FERRAND, N., et DEFFUANT, G. (1998). Trois apports potentiels des approche "multi-agents" pour l'aide à la décision publique. In "Gestion des Territoires Ruraux".
- FEUILLETTE, S., LE GOULVEN, P., et BACHTA, M. S. (1998). Les pouvoirs législatifs, réglementaires et juridiques en Tunisie confrontés à la gestion des nappes souterraines : cas de la nappe de Kairouan, Tunisie Centrale. In "Colloque SFER : L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde", Montpellier.
- FEUILLETTE, S., LE GOULVEN, P., et BOUSQUET, F. (2000). SINUSE, un outil d'exploration des interactions entre une nappe et ses usagers. In "séminaire international GIRN-ZIT", Bamako. A paraître dans les Cahiers de l'IRD.

- HORCHANI, A. (1995). Gestion des ressources en eau en Tunisie. *Agriculture de Tunisie*.
- KEFI, M. (1999). "Estimation de la rente économique de l'eau dans les PPI de Chébika," INAT, Tunis.
- LEWIS, R. O. (1993). Verification, validation and accreditation (V V&A) of models and simulations used in distributed interactive environments. In "Modelling and Simulation ESM 93" (A. Pavé, ed.), pp. 632-636. Society for Computer Simulation International, Ecole Normale Supérieure, Lyon.
- MANSOURI (1996). "Bilan de la nappe mio-plio-quadernaire de la plaine de Kairouan," SONEDE, Tunis.
- MONTGINOUL, M. (1997). Une approche économique de la gestion de l'eau d'irrigation : Des instruments, de l'information et des acteurs. Thèse de Docteur, Faculté des Sciences Economiques de Montpellier I, Montpellier.
- NAZOU MOU, Y. (1996). "Modélisation de la recharge artificielle des nappes de la plaine de Kairouan," Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunis.
- NAZOU MOU, Y., et Besbes, M. (2001). Recharge assessment and groundwater modeling in arid conditions. Cas study at Kairouan, Tunisia. In "6ème Assemblée Scientifique de l'IAHS" (H. Gehrels, ed.), Maastricht. A paraître.
- PALMER-JONES, R. (1997). Groundwater management in South Asia : what role for the market ? In "Water : economics, management and demand" (T. F. a. L. S. Melvyn Kay, ed.), pp. 381-389. E & FN Spon.
- RYKIEL, E. J. (1996). Testing ecological models : the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90, 229-244.
- STROSSER, P. (1997). Analyzing Alternative Policy Instruments for the Irrigation Sector-An assesment of the Potential for Water Market Development in the Chishtian Sub-division, Pakistan. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- TURTON, A. R. (1999). Water scarcity and social adaptative capacity : towards an understanding of the social dynamics of water demand management in developping countries. . School of Oriental and African Studies (SOAS).

# ANALYSE COUPLEE DU FONCTIONNEMENT TECHNIQUE ET SOCIAL D'UN RESEAU D'IRRIGATION : LE CAS DES GROUPEMENTS D'INTERET COLLECTIF SUR LA NAPPE DE KAIROUAN EN TUNISIE.

Faysse N., Lardilleux S., Le Goulven P.  
*IRD, BP 434, 1004 El Menzah Tunis.*

## RESUME

Avec la mobilisation de toutes les ressources disponibles, l'Etat tunisien ne peut plus contrôler l'équilibre ressources-usages sur la nappe de Kairouan qu'en maîtrisant la croissance de ces derniers. Cette maîtrise passe par, entre autres, le bon fonctionnement des périmètres irrigués collectifs. Une méthode d'analyse jointe de la production et de la distribution d'eau dans un périmètre est présentée ; elle se fonde sur la réalisation d'un bilan hydrique par champ. Une analyse du fonctionnement réel ainsi que des simulations de rénovation du réseau ou de changement de règles de distribution permettent d'ordonner l'importance des facteurs de dysfonctionnement. Cette analyse est appliquée à un périmètre irrigué de la région de Kairouan. Elle montre que la règle actuelle de distribution engendre à la fois un sur-assèchement et une gestion inefficace de la pénurie, d'où une inefficacité du même ordre que celle produite par le mauvais fonctionnement du réseau.

## MOTS-CLES

périmètre irrigué      allocation de l'eau      bilan hydrique

Dans les années 90, l'Etat tunisien a achevé la mobilisation de toutes les ressources superficielles aboutissant à la grande plaine de Kairouan. Pour assurer l'équilibre de la nappe associée à cette plaine, l'Etat est désormais obligé de maîtriser les prélèvements, et avant tout le premier d'entre eux, l'usage agricole, partagé entre puits privés et périmètres collectifs.

En absence de moyens de police adaptés, l'Etat a mis en place un dispositif d'aide à l'investissement en économie d'eau. De plus, s'il se dégage de la gestion des périmètres irrigués depuis une dizaine d'années pour des raisons initialement budgétaires, l'Etat voit dans les associations d'usagers (Groupement d'Intérêt Collectif, GIC) récemment créées une opportunité pour maîtriser la croissance des prélèvements. En effet, l'Etat contrôle le débit d'exhaure d'un GIC. Si ce dernier fonctionne bien, les agriculteurs seront moins incités à créer leur propre puits dans ou hors du GIC.

Dans le cadre du projet MERGUSIE<sup>11</sup>, une méthode d'analyse de ces périmètres a été mise en place au printemps 2000. Le constat initial était que, lors des études pour la rénovation des périmètres, le partage de l'eau était souvent négligé : les avantages de la rénovation technique ne sont pas comparés aux gains permis par une meilleure distribution de l'eau. Le GIC étant considéré comme **une unité collective de production, de distribution et de partage de l'eau**, les deux questions suivantes ont servi de fil conducteur pour l'étude :

- quelle est l'efficacité actuelle des gestions technique et sociale de l'eau ?
- quel est le potentiel de gain dans un changement des règles de partage et/ou des infrastructures ?

Les réponses pourraient permettre d'ordonner les priorités de réhabilitation, entre fonctionnement social et technique. Dans la suite du texte, la méthode d'analyse est présentée de façon générale : diagnostic d'une situation réalisée et simulations. Cette méthode est ensuite appliquée au périmètre irrigué d'El Melalsa.

## METHODE D'ANALYSE D'UN PETIT PERIMETRE IRRIGUE

Nous proposons ici une méthode d'analyse de petits périmètres irrigués soumis à une tension sur la ressource de façon structurelle.

---

<sup>11</sup> Modélisation Intégrée des Usages et de la Ressources dans le bassin du Merguellil. Le texte présente les résultats d'un travail effectué au printemps 2000 par une équipe constituée, outre les auteurs, de Olfa SOUKI (Moghrane), Até KOUKOU- TCHAMBA (INAT), Mohamed Salah BACHTA (INAT), Jean-Paul LUC (IRD) et Roger CALVEZ (IRD).



Une étude semblable a déjà été menée par Gilot (1994), sur le périmètre d'Urcuqui en Equateur. A partir d'un bilan hydrique par parcelle, Gilot ordonne les différents facteurs de dysfonctionnement possibles, individuels puis collectifs. Puis il simule l'annulation de ces facteurs dans l'ordre choisi. Il obtient, pour chaque stress hydrique sur un champ donné, l'ensemble quantifié des facteurs responsables du déficit en eau. Gilot étudie enfin l'impact d'un changement d'assolement ou d'une restructuration complète des droits d'eau.

En Tunisie, l'analyse des périmètres irrigués s'est faite simultanément à trois niveaux :

- le bilan hydrique au niveau de la parcelle puis du champ<sup>12</sup> ;
- l'analyse économique au niveau de l'exploitation agricole ( il faut alors prendre en compte aussi les parcelles situées hors du périmètre) ;
- l'étude du réseau et du fonctionnement social, à l'échelle du périmètre irrigué entier.

### **Diagnostic du fonctionnement réel**

#### **a) Bilan hydrique pour tous les champs du périmètre irrigué sur une année**

Le bilan hydrique au pas de temps journalier a été simulé avec un modèle de réservoir distinguant l'évaporation de la transpiration, le modèle du logiciel SARRA<sup>13</sup>. Pour pouvoir traiter simultanément une trentaine de champs, les équations ont été importées dans un tableur Excel nommé Bilhy. Pour les données d'irrigation au champ, une enquête exhaustive est réalisée auprès de tous les agriculteurs, concernant les données principales de leur exploitation, les surfaces possédées dans et hors périmètre, l'assolement réalisé pendant la période étudiée et l'origine de l'eau d'irrigation.

D'autre part, le cahier de l'aiguadier permet d'avoir le volume ou le temps payé à une date donnée par un agriculteur. Lorsque le tour d'eau ne permet pas de connaître le champ irrigué, et puisque les agriculteurs irriguent principalement en fonction des besoins en eau des cultures, la répartition de l'eau s'est faite selon les surfaces pondérées par les coefficients cultureux.

#### **b) Analyse du fonctionnement social du périmètre**

Cette partie a pour objet les relations entre agriculteurs et GIC. A partir d'enquêtes exhaustives, une typologie est faite d'abord en fonction du mode d'accès à l'eau (GIC ou puits en périmètre, puits hors périmètre), puis en fonction de la taille de l'exploitation, dans et hors périmètre. Une enquête approfondie est réalisée auprès d'une ou deux personnes représentantes de chacun des types, ainsi que des 3 responsables du GIC : le président, le trésorier et l'aiguadier. Cette enquête permet de discuter avec chaque agriculteur des relations qu'il entretient avec le GIC et de sa perception du fonctionnement de l'ensemble du GIC.

#### **c) Analyse économique**

L'enquête approfondie est aussi l'occasion de faire un bilan économique précis de l'exploitation pendant l'année considérée : les pratiques culturelles, les charges par cultures et les rendements obtenus. Une modélisation par programmation linéaire est calée sur les données par type.

#### **d) Simulation de scénarios**

Un périmètre irrigué peut être résumé par 3 caractéristiques principales : le réseau, les règles de répartition de l'eau et les assolements choisis.

Les agriculteurs font de façon autonome des choix de surfaces irriguées, en fonction de leurs caractéristiques propres mais aussi des règles collectives de répartition de l'eau et d'éventuelles règles de plafonnement des surfaces mises en cultures. Nous distinguons 2 types de règles. Les règles de type A déterminent un tour d'eau indépendamment des surfaces mises en cultures. C'est le cas par exemple de la règle qui attribue x heures/ha à chaque agriculteur. Chaque agriculteur choisit alors ses cultures indépendamment des autres. En revanche, les règles de type B établissent un tour d'eau qui dépend des surfaces mises par les agriculteurs : lorsque chaque agriculteur peut irriguer autant qu'il l'estime nécessaire, ou bien lorsqu'une plante est reconnue prioritaire sur une autre.

La simulation est faite à partir de triplets de paramètres en restant, en première approche, à l'échelle du périmètre irrigué. La valorisation de l'eau est calculée à partir d'une fonction de rendement fondée sur les coefficients  $K_y$  de sensibilité au stress hydrique.

---

<sup>12</sup> Par convention, une parcelle est une surface connexe possédée par un agriculteur et les champs sont les parties de la parcelle qui sont assolées avec une seule culture.

<sup>13</sup> Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques, développé par le CIRAD

## APPLICATION DE LA METHODE AU PERIMETRE D'EL MELALSA

### Le Groupement d'Intérêt Collectif de El Melalsa

El Melalsa est un GIC mixte - eau potable et irrigation -, qui fonctionne depuis 1990 et qui irrigue 114 ha. La pompe délivre 24 l/s répartis en 3 mains d'eau. Le réseau est sous pression grâce à des conduites BOER en acier galvanisé prolongées par des tuyaux en PVC souple qui mènent l'eau jusqu'à la parcelle, avec une distribution finale en gravitaire. Le manque de pression à la pompe et la vétusté du réseau font que les débits réels arrivant aux parcelles varient entre 3 et 8 l/s. Les principales cultures sont le melon et la pastèque en été, le blé et l'association piment-fève en hiver. Il n'y a pas de limitation des surfaces assolées. De plus, chaque agriculteur peut irriguer autant qu'il l'estime nécessaire une fois qu'il a la main d'eau : la règle utilisée est de type B.

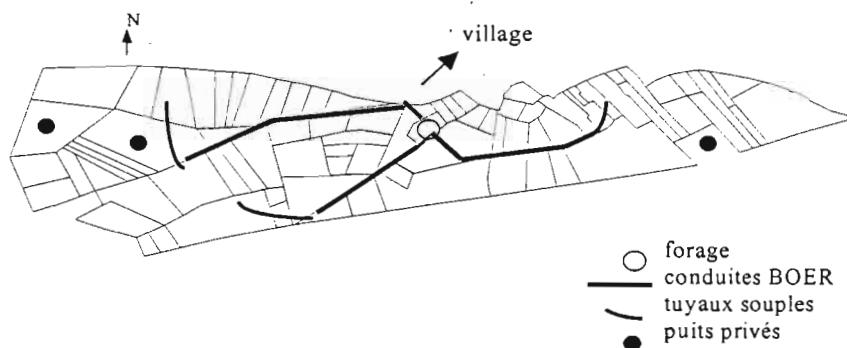


Fig. 1 : Le périmètre irrigué d'El Melalsa

L'analyse du bilan hydrique a été faite pour l'ensemble de l'année 98-99 ; nous ne présentons ci-dessous que les résultats des simulations pour le melon.

### Bilan des déficits en eau pour le melon à l'été 99

Au total, 27,2 ha soit 18 % de la surface du GIC, ont été cultivés en melon au cours de l'été 1999.

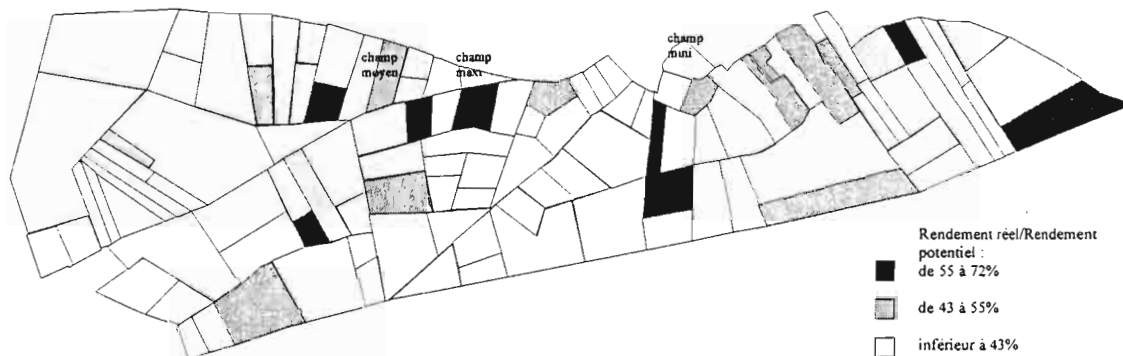


Fig. 2 : rendement réel pour le melon par champ en 99

ETR/ETM

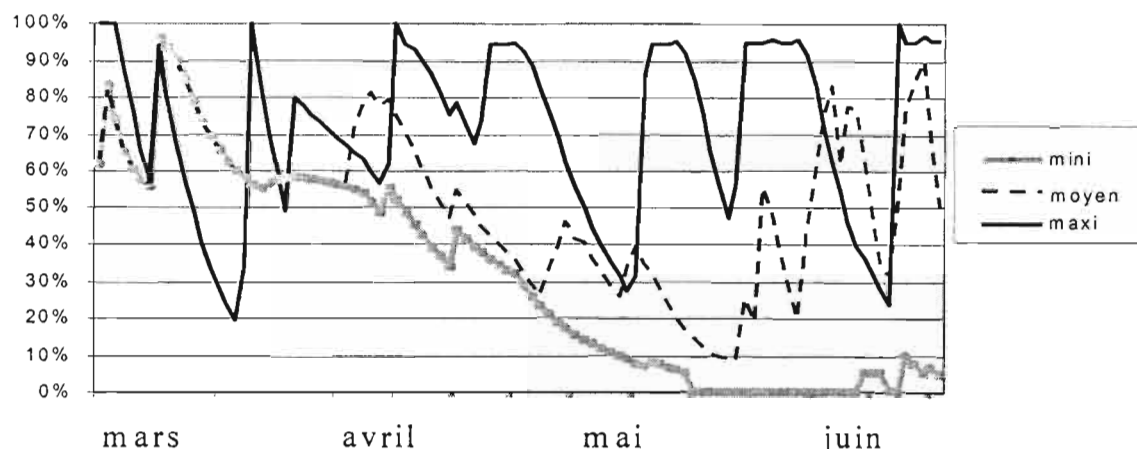


Fig. 3 : ETR/ETM du melon, pour le meilleur champ , un champ moyen et le plus mauvais champ

La surface totale assolée en mars est très importante, ce qui se traduit par un allongement du tour d'eau peu après le semis. De plus, il a très peu plu de mars à juin 99 : le manque d'eau a permis le développement du mildiou sur certains champs en avril, champs qui ont été abandonnés par la suite. Les champs restés sains ont ensuite pu être irrigués plus fréquemment par la suite, mais le prolongement de la sécheresse a maintenu une durée du tour d'eau longue. De plus, même s'il existe un ordre entre les parcelles a priori, ce tour d'eau a été discuté au fur et à mesure pendant les périodes de grandes tensions, avec une iniquité importante dans la répartition. Dans les faits, cette tension structurelle sur la ressource et la faiblesse des débits fournis en fin de réseau a provoqué, depuis plusieurs années, deux types de réaction : l'abandon des cultures maraîchères au profit du blé en mode pluvial et la construction de puits privés. A la fois le président, l'aiguadier et le pompiste ont creusé un puits pendant l'hiver 2000, soit dans soit hors du périmètre !

### Simulations

Les triplets de simulation ont été testés avec une année moyenne, une année quinquennale sèche et une année quinquennale humide. Pour construire l'année quinquennale sèche, nous avons choisi un hiver et un été, de quantile environ 0.35, de façon que la somme corresponde à une pluie d'année quinquennale sèche. La même méthode est utilisée pour les années moyennes (quantile 0.5) et humide (quantile 0.85). Nous restons à l'échelle globale du périmètre, en considérant l'existence de 3 grands champs sur le périmètre : un de fève-piment, un autre de blé et dernier de melon.

#### a) Variation sur le réseau

Le réseau actuel délivre 24 l/s, avec une perte qui va de 0% à 50%. La perte moyenne sur l'ensemble des cultures sera d'autant plus importante que la surface totale mise en culture est grande. Le réseau rénové aura un débit de 30 l/s dû à une diminution importante des pertes de charge et une absence de pertes sur le réseau.

#### Variation des assolements

Pour estimer un assolement sûr, on calcule les besoins en eau en année moyenne avec une règle qui consiste à irriguer lorsque la réserve du sol devient inférieure à 0.85 fois la Réserve Utile. Pour l'assolement risqué, nous retiendrons l'assolement réalisé en 98-99 (60 ha de blé, 21 de piment-fève et 27 de melon et pastèque). L'assolement risqué, avec un réseau rénové, est l'assolement précédent multiplié par le coefficient de gain sur le débit et les pertes (voir table 1 ci-dessous).

#### Variation du tour d'eau

Lorsque la règle de distribution de l'eau est de type A, le problème, identique au niveau individuel et collectif, est de répartir au mieux une ressource de débit donné entre différentes cultures. Nous avons choisi, pour modéliser cette approche, de travailler au niveau du GIC : les besoins de chaque culture sont la quantité d'eau nécessaire pour remplir le maximum entre les réservoirs sol et plante dès lors que ce dernier est

inférieur à 0.7 fois la Réserve Utile. Si la somme des besoins est supérieure à la capacité du forage, la répartition se fait proportionnellement aux besoins.

Pour modéliser les règles de gestion du deuxième type, celles où le tour d'eau est modifié par les choix d'assolement, un modèle a été construit avec Bilhy de calcul de la longueur du tour d'eau : à un jour donné, on apporte les besoins. Le tableur calcule le temps nécessaire pour une telle opération en fonction du débit journalier et ne recommence l'irrigation qu'au bout de cette durée.

#### d) Tests de différents scénarios possibles

L'ensemble des triplets envisagés donne lieu à 9 scénarios différents (table 1). Quatre facteurs peuvent expliquer le mauvais fonctionnement d'El Melalsa : l'état du réseau, les règles de construction du tour d'eau, les choix d'assolement et l'équité de la distribution. Nos scénarios ne permettent de comparer que ces 3 premiers facteurs. Néanmoins, on peut considérer que la différence entre la valorisation qui a réellement eu lieu en 98-99 (scénario 0) et le scénario 1 est due en grande partie à l'iniquité de la distribution.

TABLE 1 : valorisation de l'eau selon différents scénarios

scénario	réseau	assolement	surface	tour d'eau	valeur totale, en milliers de DT, crée avec une pluie correspondant à :			
					98-99	année humide	année moyenne	année sèche
0 (réel)	actuel	risqué	(61,21,27)	type B	<50			
1	actuel	risqué	(61,21,27)	type B	103	147	141	80
2				type A	141	150	148	138
3		sûr	(40,20,15)	type B	116	122	114	112
4				type A	118	121	119	118
5	renové	risqué	(91,31,40)	type B	177	226	197	147
6				type A	226	240	235	224
7		sûr	(60,30,23)	type B	176	185	180	167
8				type A	179	183	180	179

Dans tous les cas, l'assolement risqué permet une meilleure valorisation en moyenne que l'assolement sûr, mais avec une variance plus importante. D'autre part, à assolement sûr, les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur : en effet, si la règle « à volonté » de permet pas d'arbitrer entre les différentes cultures, elle permet de mieux jouer sur la réserve du sol, puisque nous avons pris une règle très prudente pour l'irrigation journalière (un seuil de déclenchement de 0.85 fois la Réserve utile).

En fait, la définition du tour d'eau et le choix total de l'assolement sont liés dans le cas d'un tour d'eau « à volonté ». Avec une surface collective qui permettrait un tour d'eau pas trop long, chaque agriculteur va avoir tendance à augmenter sa surface irriguée car il ne va pas prendre en compte l'impact de son choix sur la longueur de ce tour d'eau. Chaque agriculteur faisant ce raisonnement individuellement, l'assolement total collectif « à l'équilibre » sera en général bien supérieur à celui qui aurait été optimal, à la fois pour la collectivité et pour chacun des agriculteurs. De plus, un tour d'eau « à volonté » ne permet pas, à assolement donné, de donner la priorité aux plantes qui en aurait besoin.

La comparaison des différents scénarios permet de hiérarchiser les causes de dysfonctionnement mesurées : d'abord le tour d'eau, puis le réseau et enfin l'assolement.

#### La précision de la méthode

Aux imprécisions classiques d'un modèle de bilan hydrique vient s'ajouter une imprécision sur les surfaces. Si les surfaces des parcelles sont généralement connues précisément grâce à des réformes agraires projetées ou effectuées, les agriculteurs donnent des surfaces relatives de leurs différents champs très grossièrement. Analysant une année passée, nous n'avons pas pu, de nous même, améliorer la précision sur ces surfaces. Cela dit, les résultats obtenus pour l'étude de l'irrigation pendant l'année 98-99 ont abouti à un

classement et une analyse qualitative qui nous ont été confirmés par les agriculteurs. De plus, cette imprécision intervient peu dans la comparaison des différents scénarios de réformes présentés ci-dessus.

## CONCLUSION

Le logiciel Bilhy s'est montré lourd à mettre en œuvre. Il n'est pas adapté à l'étude standardisée d'un périmètre irrigué. Néanmoins, la souplesse d'un tableur Excel, où toutes les données sont apparentes, permet de concevoir très facilement des scénarios, des règles de décision d'irrigation : Bilhy reste un logiciel intéressant pour une approche « recherche ».

De plus, nous n'avons présenté l'analyse ici qu'au niveau agrégé du périmètre. Le travail consistera aussi à intégrer les règles de gestion de l'eau dans le programme économique représentant les choix d'assolements des agriculteurs. Une telle modélisation devrait permettre, à infrastructure, structures d'exploitation et règles de gestion données, de rendre les choix de mise en culture des agriculteurs complètement endogènes.

Dans le Kairounais, beaucoup de périmètres publics irrigués ont vocation à être rénovés puis délégués à des associations d'irrigants dans les années à venir. Les nombreuses études faites privilégient les aspects techniques et prévoient ex-ante l'assolement qui sera suivi une fois la rénovation faite. L'approche présentée ci-dessus permet d'évaluer l'importance du facteur « partage de l'eau » par rapport au facteur « infrastructure ». Le complément envisagé, par le biais de la programmation linéaire, permettra lui de d'intégrer l'autonomie de décision des agriculteurs et donc d'aider à prévoir quelle seront leurs réactions suite à un changement d'infrastructure ou de règle de partage. Il serait intéressant de dégager, à partir de cette étude, une méthodologie d'analyse du bilan hydrique et des règles de gestion de l'eau qui puisse être intégrée dans la démarche d'un bureau d'étude.

## REFERENCES

- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M. (1998) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing, crop water requirements *Bulletin FAO d'irrigation et de drainage* n°56 Rome.
- BARON C., MARAUX F., PEREZ P. (1996) SARRA Système d'analyse régionale des risques agroclimatiques MODULE SARRABIL Guide d'utilisation – Montpellier : CIRAD.
- GILOT L. (1994) L'eau des livres et l'eau des champs. Des règles de distribution à leur mise en pratique. Principes généraux et analyse du cas d'Urcuqui. - Thèse de doctorat. Sciences agronomiques : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier.
- LARDILLEUX S. (2000) Fonctionnement de périmètres irrigués à différents stades d'évolution en Tunisie Centrale. Analyse des irrigations par modélisation du bilan hydrique. – Projet de fin d'étude – Strasbourg, ENGEES.

# GESTION CONSERVATOIRE DE L'EAU DE LA RETENUE COLLINAIRE SABOUN (TANGEROIS) : BILAN HYDROLOGIQUE ET STRATEGIE COMMUNAUTAIRE

Mejjati Alami M., Merzouk A. et Berkat O.

*Département des Sciences du Sol et d'Ecologie Végétale, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.*

## RESUME

Les collines rifaines, bien qu'elles soient assez arrosées (700-900 mm), connaissent des problèmes de disponibilité en eau potable pour la population rurale et pour l'abreuvement du cheptel. Le recours aux retenues collinaires pour la mobilisation des eaux de surface a connu au Maroc une nouvelle dynamique à partir des années 1980. Si le côté technique a bien connu une modernisation et une mise à jour, la procédure de gestion communautaire connaît par contre un retard dans l'application des nouveaux modèles de gestion, basés sur la participation effective des ayants-droits, et leur organisation en associations des usagers des eaux agricoles. Ces AUEA seront appelées à jouer un rôle crucial dans la rationalisation et l'économie de l'eau dans ces zones. Aujourd'hui, le site expérimental Saboun (Projet Hydromed-Maroc, parrainé par l'Union Européenne et l'IRD) offre la possibilité technique de connaître, avec précision, les termes du bilan hydrologique, et ce pour déterminer un chronogramme des disponibilités en eau. Ce dernier représente l'ossature d'un programme d'utilisation conservatoire. Le barrage collinaire Saboun assure la sécurisation en toutes saisons de l'abreuvement du cheptel; axe central de la stratégie des éleveurs. Ceci est en accord avec les principes retenus pour le programme de l'hydraulique pastorale. Cependant, les actions d'accompagnement indispensables : appui aux systèmes de gestion de l'eau, structuration des organisations d'agriculteurs, développement agricole et introduction des nouvelles techniques plus économes en eau tardent à venir. Le présent travail sur ce site pilote propose une procédure et des mécanismes de gestion conservatoire de l'eau de la retenue combinant les paramètres hydrologiques et les éléments de gestion communautaire. Aux paramètres hydrologiques à savoir les apports, crues et envasement, l'étude justifie et remet en tête de la matrice d'évaluation les indicateurs portant sur le degré d'implication des bénéficiaires, leur participation aux investissements en aval et en amont et leur organisation pour une gestion communautaire et conservatoire de la ressource. Un système d'information géographique de l'hydrosystème (Bassin versant/aval) permet de mieux intégrer ses paramètres. Il s'agit d'un prototype proposé pour extrapolation à d'autres zones et une contribution au référentiel marocain en matière d'utilisation des petites retenues artificielles dans la mise en valeur des terres.

## INTRODUCTION

Le Maroc est un pays dont les ressources en eau sont relativement limitées. Il dispose d'un potentiel hydraulique mobilisable annuellement de 29 milliard de m<sup>3</sup>, dont seules 20 milliard de m<sup>3</sup> sont mobilisables dans les conditions techniques et économiques actuelles (DGH, 1998). Des efforts importants déployés depuis les années 70 lui ont permis d'édifier 90 grands barrages avec une capacité de plus de 14 milliards de m<sup>3</sup>. Cette ressource est caractérisée par une disparité régionale, une demande croissante et surtout une forte sensibilité aux aléas climatiques. En effet, au cours des périodes de sécheresse, devenues plus aiguës et fréquentes au cours de ces dernières années, le déficit en eau se montre parfois plus grave et touche presque tout le Royaume. Le monde rural, qui constitue plus 50% de la population, reste le plus touché par le manque d'eau en période de sécheresse (Mahfoud, 1989). Si les grands barrages ont contribué au développement socio-économique des périmètres irrigués des grandes plaines (irrigation, alimentation en eau potable des villes et du secteur industriel), les zones bour, par contre, restent tributaires des aléas climatiques et en retard en terme de développement (MADRPM, 2000). Pour pallier à ce déficit en eau et ses conséquences sur les populations rurales, une nouvelle stratégie de mobilisation a été adoptée depuis les années 80 afin de permettre une régularisation accrue des eaux de surface et d'en offrir d'avantage au monde rural, par le biais des petits barrages et lacs collinaires (Bzioui, 1986). Une convention a été conjointement signée par les départements ministériels concernés et portait sur la réalisation de lacs et barrages collinaires nécessaires au développement socio-économique des zones rurales accusant un important déficit en ressources en eaux souterraines. Ces petites infrastructures hydrauliques assurent l'alimentation en eau potable des populations limitrophes, l'abreuvement du cheptel, l'irrigation de petits périmètres, la réalimentation des nappes souterraines locales, et dans quelques cas, la protection des populations et des biens contre les inondations.

Ils peuvent engendrer des effets indirects sur l'économie et surtout à l'échelle régionale, en permettant la création d'un certain nombre d'emploi temporaire au cours de la réalisation des aménagements.

Le Maroc dispose aujourd'hui d'un parc de 112 lacs et 54 barrages collinaires, qui représente un vaste chantier d'observation et d'évaluation du fonctionnement et de l'impact de ces infrastructures. Si les aspects techniques ont été plus ou moins maîtrisés (et ce malgré l'absence d'un référentiel spécifique), l'exploitation et la gestion non coordonnée entre l'état et les utilisateurs posent encore des problèmes de suivi. Actuellement, certaines de ces infrastructures se trouvent dans un état critique, due à la dégradation de leur environnement. Sans aucun aménagement du bassin versant et de suivi du bilan en eau, ces retenues restent victimes de toute sorte de pollution et d'envasement qui entraînent une dégradation de leur qualité d'eau et une diminution progressive de leur capacité utile.

Dans les zones semi-arides et arides, l'élevage est une activité de toute première importance. La sécurisation en toutes saisons de l'abreuvement du bétail est donc un axe central de la stratégie des éleveurs. La région de l'Oriental, qui couvre une superficie de 82 820 Km<sup>2</sup> (11,6 % du territoire national), ne possède qu'un parc limité de 27 barrages et lacs collinaires. Cet exemple illustre amplement le besoin en ces infrastructures, cependant la gestion pratique des lacs collinaires reste encore mal définie. Le partage des responsabilités de cette gestion entre état, particulier et collectivité n'est pas bien déterminé.

Ces projets de construction des lacs et barrages collinaires sont très complexes, souvent par l'existence de plusieurs intervenants (départements ministériels) pour la conception, la réalisation et l'exploitation. Ainsi, les responsables et décideurs sont appelés à : avoir plus de coordination entre les départements qui s'occupent de l'exploitation et la gestion des lacs et barrages collinaires, donner un appui à la vulgarisation et à la sensibilité des agriculteurs pour l'exploitation des eaux stockées, aider les ayants-droit à mieux s'organiser et gérer les équipements, donner plus de soutien à la création d'associations des usagers et déblocage des lignes de crédit de compagnes spécifiques, et encourager la promotion des petits métiers et services annexes à l'activité agricole.

Dans l'optique de cette problématique générale et pour une meilleure gestion et de suivi des ressources en eau disponible dans ces retenues très sensibles aux variations de bilan hydrique et de l'envasement, un effort de recherche est actuellement mobilisé par l'institut de recherche pour le développement (IRD) et ses partenaires marocains, représentés par IAV Hassan, dont l'objectif est de caractériser le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants et de leurs retenues collinaires à travers une évaluation technique des paramètres du bilan à des pas de temps suffisamment courts et des mesures de l'envasement pour la détermination du volume d'eau disponible et la vitesse de sédimentation.

## **PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

### **Cadre physiographique**

La zone d'étude est représentée par le bassin versant (753 ha) et du barrage Saboun (d'une capacité de 1.1Mm<sup>3</sup>, de 15m de hauteur et d'un déversoir latéral de 8m, mis en service en 1991), situé à 15 km au sud de la ville de Tanger. Ce site est localisé dans la partie occidentale de la chaîne rifaine. Son bassin versant est caractérisé par des faciès imperméables, formés essentiellement de dépôts de marne argileux ou plus au moins calcaires finement schisteux d'âge Sénonien. Sur ces unités lithologiques très friables se sont développés des sols limoneux argileux à caractère vertique très sensibles aux phénomènes de gonflement et de retrait avec une faible variabilité latérale de leurs caractéristiques physiques tel que la densité, la texture et la perméabilité (Merzouk et al., 1998).

La zone est caractérisée par un climat subhumide, marqué par une grande variabilité inter-annuelle, de l'ordre de 23 %. En effet, l'analyse des données pluviométriques entre 1965 et 1995 (station Kalaya) montre que la moyenne annuelle est de 743 mm, oscillant entre un minimum de 394 mm et un maximum de 1153 mm (Chikhaoui, 1999).

L'occupation des sols est limitée à des terrains naturels en jachère, utilisés comme parcours dans les bas fonds qui représentent 59% de la superficie totale du bassin et des terrains de culture de sorgho en pente douce. En absence d'une couverture végétale ligneuse, la surface des sols est exposée à une érosion hydrique importante par détachement, sous l'action des gouttes de pluie et de ruissellement, en particulier après une longue période de sécheresse estivale. Plus de 82% de la superficie du bassin est représentée par une érosion hydrique non apparente ou en nappe qui se manifeste sur des versants de forme convexe avec des pentes faibles à moyennes. Tandis que l'érosion par ravinement (rigoles et ravins) et les phénomènes de solifluxion



(glissement et sapements des berges) sont limitées à la partie amont du bassin où les pentes dépassent les 30%.

### **Population et problématique de l'eau agricole et pastorale**

Le Rif est l'une des régions les plus peuplées du Maroc. Il est occupé par environ 15 % de la population nationale (Berkat, 1993). Cette surpopulation des régions rifaines s'est traduite par une surexploitation du milieu ( mise en culture, incendies, défrichements, surpâturage...), entraînant par la suite une régression du couvert végétal. Environ 463 ha et 398 ha des matorrals rifains sont dégradés annuellement par les incendies et les défrichements (Mallyani, 1988), résultant en une amplification de tous les phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols qui occasionnent des pertes importantes de production fourragère, ligneuse et de terres arables. Cette zone fait partie de la région la plus humide (pluvieuse) du pays, cependant les réserves en eau restent limitées, et ce pour des raisons liées à la nature imperméable des sols et aux conséquences de l'érosion intense, due à l'action humaine.

La sécurisation foncière des exploitants est une question importante pour le développement car elle est souvent la condition de la pérennité des investissements et de l'efficacité de l'exploitation. Les usagers sont plus enclins à participer au financement des aménagements quand ils détiennent un droit définitif d'exploitation. Quand les terres aménagées appartiennent au domaine national et que les exploitants n'ont qu'un droit d'usage précaire, il est plus difficile de les responsabiliser.

L'aménagement des terres en culture ou l'utilisation pastorale posent rapidement le problème de l'efficacité de l'utilisation de l'eau. En effet, les différents utilisateurs de cette ressource peuvent facilement entrer en conflit.

Les projets de lacs et barrages collinaires déjà réalisés ont été très complexes, souvent par l'existence de plusieurs intervenants (départements ministériels). Dans l'optique de cette problématique générale et pour une meilleure gestion et suivi des ressources en eau disponible dans ces retenues, très sensibles aux variations du bilan hydrique et de l'envasement, un effort de recherche a été consenti par l'IRD et ses partenaires marocains représentés par l'IAV Hassan II. L'objectif est de caractériser le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants et de leurs retenues collinaires, à travers une évaluation technique des paramètres du bilan, à des pas de temps suffisamment courts et des mesures de l'envasement pour la détermination du volume d'eau disponible, ainsi que l'utilisation de cette ressource par les agriculteurs-éleveurs.

## **FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE**

### **Paramètres du bilan hydrologique**

La détermination du bilan hydrique d'une retenue collinaire consiste à mesurer tous les paramètres impliqués dans l'équation du bilan qui découle de l'application du principe de conservation des volumes d'eau suivants (Albergel et al., 1997) :  $\Delta v = (V_r + V_{ecs} + V_p + V_f) - (V_{ev} + V_d + V_{vi} + V_i + V_u)$

Avec  $\Delta V$  : Variation du volume ;  $V_r$  : volume ruisselé ;  $V_{ecs}$  : volume d'apport sous terrain ;  $V_p$  : volume d'apport de la pluie ;  $V_f$  : volume de fonte des neiges ;  $V_{ev}$  : volume d'évaporation ;  $V_d$  : volume déversé ;  $V_i$  : volume vidangé ;  $V_i$  : volume infiltré ;  $V_u$  : volume utilisé.



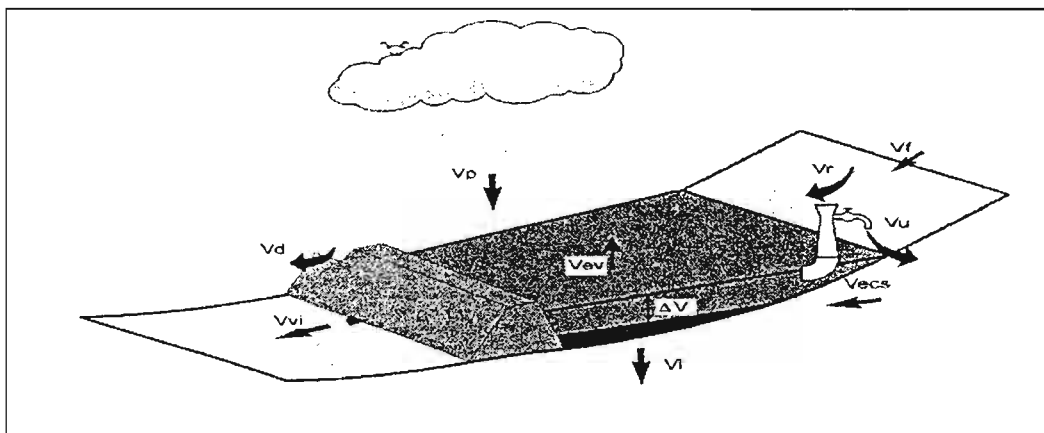


Fig. : Bilan hydrologique des lacs collinaires

#### - Volume précipité sur le lac

Le volume d'apport de pluie, tombant directement dans la retenue, est déterminé en traduisant les volumes obtenus par le pluviographe, à l'échelle de la surface inondée de la retenue. Celle-ci est déterminée en fonction de la cote enregistrée par la sonde et la courbe hauteur/surface du barrage.

#### - Volume déversé

Le barrage est équipé d'un déversoir de forme rectangulaire de 8m de largeur, déversant à la cote de 6.68m. Les débits d'eau déversés sont calculés en fonction de la courbe  $Q_{\text{déversé}} = f(\text{cote})$  et les paramètres de déversoir, selon l'équation de Manning-Strickler. Lorsque la cote dépasse le niveau de déversement

$$Q = s \cdot n \cdot i^{1/2} \cdot Rh^{2/3}$$

Q : le débit en m<sup>3</sup>/s ; s : la section mouillée ; n : le coefficient de rugosité de Strickler, i : la pente d'eau 1% ; Rh : le rayon hydraulique en m ; avec  $Rh = s/p$  (p étant le périmètre de la section mouillée).

#### - Volume des apports

Les apports sont reconstitués à partir de la variation de la cote de la retenue, pour une précision de 1cm de hauteur et pour un pas temps de 5 mn. Parfois, on utilise une précision de 2 cm pour éviter l'action des déferlements des vagues. Les débits et les volumes instantanés entrant sont déterminés à partir de l'équation de la conservation des volumes suivants :  $Q_e = Q_d + (dv/dt) - Q_p$

Q<sub>e</sub> : le débit entrant dans la retenue (m<sup>3</sup>/s) ; Q<sub>d</sub> : le débit déversé (m<sup>3</sup>/s) ; Q<sub>p</sub> : le débit tombant directement sur la retenue (m<sup>3</sup>/s) ; dv/dt : la variation instantanée du volume d'eau retenue dans le lac en m<sup>3</sup>/s.

#### - Volume évaporé

L'évaporation est déterminée directement par des mesures du bac, réalisées chaque jour à 8H du matin par le gardien de la station. Ces données sont extrapolées à la surface de la retenue, en multipliant le cumul journalier par la superficie du plan d'eau, déduite de la courbe hauteur / surface.

#### - Volume de vidange

Ce dernier dépend des volumes de crues. Quand ces derniers sont importants, le technicien ouvre la vanne et note la durée écoulée. Ainsi, on peut déterminer avec précision le volume vidangé en fonction de la dimension de la vanne.

#### Estimation des besoins

L'étude de ce paramètre a été difficile à cerner, et ce en raison du retard accumulé dans l'aménagement du petit périmètre irrigué. Dans le secteur Ain Dalia, uniquement 30 hectares sont irrigués ; pour un potentiel de 400 hectares. 50% des parcelles sont équipées de conduites en terre (séguías). La gestion

de l'eau à la parcelle pose problème à cause du manque de nivellement. De plus, ces séguías entraînent des fuites d'eau assez conséquentes par rapport aux conduites en PVC. Le choix du système de conduite et le manque d'entretien de l'équipement hydro-agricole sont la cause de cette situation, qui en fait a découragé certains agriculteurs à démarrer l'irrigation. L'autre secteur irrigué, la zone de Guaret (plus de 200 hectares), équipée par des conduites d'eau en terre (séguías) n'est pas encore fonctionnelle, et ceux pour de multiples raisons évoquées par les agriculteurs. Tout d'abord, les parcelles sont de petite taille et très dispersées. Un remembrement devait être réalisé afin de faciliter l'accès de ces agriculteurs à leurs parcelles. De plus, le canal principal, venant du barrage collinaire Sghir était cassé et entraînait des fuites d'eau.

Les principales cultures pratiquées dans le secteur Ain Dalia sont le sorgho fourrager, les légumes, le melon et dernièrement le bersim et la luzerne. Les discussions avec le comité de l'association des usagers des eaux agricoles, ont montré clairement l'intérêt que portent les agriculteurs à l'alimentation de leur bétail. En effet, les cultures prioritaires sont les fourrages cultivés au printemps, et ce pour fournir les unités fourragères à leur cheptel lors de la période de soudure (été - début automne). Des enquêtes ont été réalisées afin d'estimer les quantités prélevées par les habitants des différents douars, utilisateurs de l'eau du barrage pour leur besoins ménagers et l'abreuvement de leur cheptel. Ces enquêtes ont touché trois douars : Daimous

(200 foyers) en amont du barrage, Guaret Mharza et Guaret Michaâla (120 foyers) en aval. Pour le Daimous, l'eau du barrage n'est généralement utilisée que lorsque les puits localisés au douar sont secs, et ce principalement en été. Les agriculteurs-éleveurs sont autorisés de prélever l'eau du barrage, uniquement dans les bidons en plastique (le bidon a une contenance de 30 l), et non dans des citernes. Les grandes exploitations sont localisées au bord du lac et ainsi profitent beaucoup plus pour l'abreuvement de leur cheptel.

Les besoins en eau pour les usages domestiques des 320 foyers des trois douars précités sont d'environ 12.800 m<sup>3</sup>, et ce pendant la période sèche (mai-octobre). Alors que les besoins des troupeaux s'élèvent à environ 13.870 m<sup>3</sup>. Ces estimations ont été basées sur les valeurs "normes" pour chaque type d'utilisateur : homme (18 l/personne/jour); bovin (31 l/tête/jour); ovins et caprins (2 l/tête/jour)).

### **Erosion des sols et envasement de la retenue**

La sédimentation dans la retenue Saboun a été mesurée en utilisant la méthode bathymétrique (IRD, 1996). Les résultats ont montré que l'envasement du barrage est de l'ordre de 18 %. Ce taux, calculé pour une durée de 9 ans (1991-1999), représente une diminution de la capacité initiale de la retenue d'environ 196.010 m<sup>3</sup>. Cette dernière est liée à une dégradation spécifique du bassin versant de 43 t/ha/an.

L'aménagement du bassin versant pour réduire les apports solides et une utilisation rationnelle de la vidange sont nécessaires. En effet, 60 % des apports de 97/98 sont déversés et 45% ont été vidangés en 98/99.

## **GESTION ET DURABILITE DE LA RETENUE**

Tant pour l'élevage que l'agriculture, l'eau est un facteur de production primordial. Au Maroc, cette ressource n'est pas abondante et les différents utilisateurs sont vite en concurrence. Cela implique le plus souvent la recherche de l'optimisation des consommations et la réduction des gaspillages. Une gestion rationnelle des ressources en eau, qui permette la satisfaction des besoins, doit être la devise de tout responsable de ce secteur.

Dans le cas du Saboun, l'installation du barrage depuis 1991, visait essentiellement d'assurer l'abreuvement du cheptel et l'irrigation de la plaine de Mharhar, en plus de l'alimentation de la nappe phréatique. Cette plaine représente un des potentiels agricoles les plus favorables de la région de Tanger. Sa proximité de la ville lui permet une commercialisation immédiate des produits agricoles. L'idée de départ a été reprise dans le cadre du programme de lacs collinaires pour pousser la mise en valeur d'un territoire qui présente les conditions nécessaires pour un développement concret. L'électrification tardive de la station de pompage (juin 1999) et le retard cumulé dans la réalisation de l'aménagement du petit périmètre irrigué (juillet 2000), ont développé beaucoup plus de frustrations chez la population riveraine. D'autant plus que ce sont les grandes exploitations, localisées au bord du lac, qui ont beaucoup plus profité pour l'alimentation de leurs propres puits et l'abreuvement de leur cheptel. L'organisation des ayants-droit en association des usagers de l'eau agricole (AUEA) n'a vu réellement le jour qu'en Juillet-Août 2000, soit 9 ans après la mise en service du barrage Saboun. Les foyers enquêtés ont rapporté qu'en général l'installation de ce barrage n'a pas eu un impact remarquable sur leur situation sociale et économique. D'après nos observations, on peut dire que les riverains ont bénéficié de cette infrastructure, surtout en terme de production animale

(abreuvement du cheptel). Avant la construction de cet ouvrage, les agriculteurs-éleveurs étaient contraints de vendre une partie de l'effectif animal pendant la période estivale, et surtout lors des années sèches. Les habitants des différents douars à proximité du lac, ont aussi utilisé l'eau du barrage pour leurs besoins domestiques. Ces derniers étaient contraints d'acheter l'eau à raison de 125 dirhams la tonne, et ce lors des années de sécheresse, qui sont devenues assez récurrentes. Cet exemple illustre bien les retombées sociales et économiques d'une telle infrastructure. Cependant, si la gestion n'est pas maîtrisée, les conflits entre les différents utilisateurs apparaissent et les tensions entre foyers qui en résultent, peuvent aboutir à une utilisation anarchique, non efficiente, pouvant ainsi compromettre le devenir de la retenue (quantité et qualité de l'eau).

Les départements ministériels chargés du projet n'ont pas fait appel à l'approche participative au départ, afin de sensibiliser et responsabiliser les futurs utilisateurs de l'eau du barrage. Le retard pris pour constituer l'AUEA a eu un impact réel sur la valorisation de l'eau du barrage.

## CONCLUSION

La politique des lacs et barrages collinaires, entamée au Maroc lors des années 1980, a donné un élan au développement socio-économique des populations à l'échelle locale. Elle a permis la stabilité des populations et ainsi réduit l'exode rural, surtout lors des années sèches, qui sont devenues assez récurrentes.

Le manque de coordination entre les différents partenaires et l'implication insuffisante des bénéficiaires, n'ont pas conduit à la responsabilisation et à la professionnalisation progressive des usagers des réseaux groupés en associations. En conséquence, la dynamique instaurée initialement s'est vite heurtée à un blocage, dû essentiellement à une gestion pas souvent conservatoire des ressources en eau et à la faiblesse des ressources dégagées pour l'entretien des infrastructures.

Avec la poussée démographique que connaît le pays et ses conséquences sur l'augmentation des besoins en eau, les décideurs sont appelés à mieux réfléchir sur les programmes d'hydraulique agricole et pastorale, à adopter pour les années futures. Nous pensons qu'il est impératif de développer de nouveaux programmes et de travailler beaucoup plus avec un esprit de partenariat et symbiose, et ce afin de réussir de nouveaux projets, qui sont essentiels pour le développement socio-économique local.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERKAT, O. 1993. Stratégie de développement de l'élevage et des terres de parcours. Tome I, situation actuelle des ressources. Direction de l'Elevage, Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et des Pêches Maritimes.
- BZIOUI, M. 1986. La mobilisation de l'eau par les barrages collinaires. *Revue Marocaine du Génie Civil et des Travaux Publics* : N°14, pp 2-7.
- CHIKHAOUI, M. 1998. Fonctionnement hydrologique et risques d'envasement du barrage collinaire Saboun (Tangérois). Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle Agronomie, IAV Hassan II, Rabat.
- DGH. 1998. Les grands barrages du Royaume. Direction Générale de l'Hydraulique.
- IRD. 1996. Institut Français pour la Recherche et Développement.
- MAHFOUD, J. 1989. Communication sur les barrages collinaires. *Terre, Homme et Eaux* : N° 74-75, pp 6.
- MALLYANI, M. 1988. Cartographie et évaluation de la dégradation des types de peuplements entre 1963 et 1987 dans la forêt de Médiar, Tanger. Mémoire de 3<sup>ème</sup> cycle Agronomie, IAV Hassan II, Rabat.
- MERZOUK, A., MEJJATI ALAMI M., ABDELLAOUI B., et BERKAT O. 1998. Rupture des écosystèmes pastoraux du Rif centro-occidental : conséquences hydrologiques et besoins en suivi. In Colloque International "L'observation spatiale : un outil pour l'étude du bassin méditerranéen. Tunis, 23-27 novembre 1998. Centre National d'Etudes Spatiales (CNEO), Toulouse, France.
- MADRPM, 2000. Développement rural intégré et investissements agricoles dans les zones bour. Documents du Colloque National de l'Agriculture et du Développement Rural, Rabat, les 19 et 20 Juillet 2000. Ministère de l'Agriculture du Développement Rural et de la Pêche Maritime (MADRPM).

# QUELLES DONNEES HYDROLOGIQUES PERTINENTES POUR EVALUER LES RESSOURCES EN EAU DES PAYS MEDITERRANEENS ?

Margat J.

*Plan Bleu pour l'environnement et le développement en Méditerranée*

*15, rue L.V Beethoven, Sophia-Antipolis. 06560 Valbonne, France*

[planbleu@planbleu.org](mailto:planbleu@planbleu.org)

## RÉSUMÉ

Les estimations de ressources en eau naturelles des pays méditerranéens, présentées dans les synthèses et documents de planification nationaux ou régionaux, analysés par le Plan Bleu, se basent sur des chiffrages "macro hydrologiques" qui procèdent de deux approches différentes :

(1)- Sommation des écoulements sortants mesurés (réels), extrapolés aux bassins sans jaugeage, généralement sans effort de reconstitution des débits naturels ni d'homogénéisation des périodes de référence, et avec le risque d'influence de déperditions d'écoulements formés dans les parties amont des bassins (donc de sous-estimation de ressources).

(2)- Modélisation des apports internes à partir des données hydro-climatiques, avec une meilleure homogénéité spatio-temporelle mais des incertitudes suivant les paramètres du modèle précipitations/écoulement appliqué (réserve utile...), le pas de temps de calcul et la méthode de régionalisation. Cette divergence, non seulement de méthode mais aussi de concept, affaiblit la comparativité des tableaux de synthèse et des indicateurs macro-économiques déduits. Un effort d'homogénéisation associant les hydrologues des pays méditerranéens paraît opportun.

## MOTS-CLEFS

Bassin méditerranéen, débit naturel, débit réel, données hydrologiques, indicateurs, modélisation, régionalisation, ressources en eau.

## INTRODUCTION

Dans le cadre des travaux d'analyse et de prospective entrepris par le Plan Bleu depuis deux décennies sur les problèmes de l'eau dans le monde méditerranéen une attention particulière a été naturellement portée aux évaluations de ressources en eau. Les chiffrages de celles-ci, qui se réfèrent aux pays entiers, au bassin Méditerranéen de chaque pays ou à des bassins définis comme champ de compétence d'institution de gestion des ressources, constituent des informations primordiales pour l'élaboration des politiques de l'eau et, rapportés aux populations ou aux demandes en eau présentes ou futures, ils servent au calcul de différents indicateurs macro-économiques fondamentaux.

Les estimations de ressources en eau naturelles et renouvelables, internes à chaque territoire, voire externes en cas d'apport de territoire frontalier, reposent partout sur le traitement de données hydrologiques. Cependant l'analyse comparative des monographies ou documents de planification nationaux ou régionaux, et de leurs révisions ou actualisations successives, montre que les chiffrages présentés procèdent de deux approches différentes dont la convergence n'est pas assurée, ce qui pose problème au plan des synthèses méditerranéennes.

Ces deux approches seront brièvement rappelées en soulignant leurs avantages et défauts respectifs, pour conclure à l'opportunité d'un débat entre hydrologues en vue de rendre les chiffrages de ressource plus homogènes.

## L'APPROCHE CLASSIQUE "HYDROMETRIQUE"

Longtemps exclusive et encore à présent la plus pratiquée, cette approche est basée principalement sur les mesures des écoulements sortants du territoire, voire entrants, donc sur les données de réseaux hydrométriques, complétées par des extrapolations pour les parties du territoire non comprises dans les bassins dominant des stations de mesure (zones côtières le plus souvent).

Les ressources en eau intérieures sont alors chiffrées par la somme des écoulements sortants, dont sont déduits les éventuels apports externes.

Face à l'avantage d'être basée sur des mesures directes, d'autant plus lorsque la proportion du territoire comprise dans les bassins à écoulement jaugé est forte, cette approche est sujette cependant à plusieurs défauts :

- Les périodes de référence des historiques de données hydrologiques disponibles aux différents points de mesure ne sont pas toujours homogènes ; des efforts d'homogénéisation s'avèrent nécessaires et ils peuvent requérir des extrapolations dans le temps (notamment par modélisation précipitations/écoulements) pour référer l'ensemble à une période commune assez longue (20 à 30 années).
- Cette approche privilégie les écoulements d'eau de surface ; elle exclut les écoulements souterrains sortants sans doute plus difficilement chiffrables (mais moins variables), qui ne sont cependant pas négligeables dans beaucoup de pays méditerranéens et qui doivent être ajoutés. Globalement les afflux souterrains à la Méditerranée sont estimés de l'ordre d'une quarantaine de km<sup>3</sup>/an.
- Les écoulements mesurés sont réels et non naturels. La reconstitution des écoulements naturels implique l'estimation des influences (consommations humaines), souvent malaisée, d'autant plus que ces influences ont évolué généralement de manière tendancielle (croissante) sur une période pluri-annuelle assez longue, ce qui interdit de les traduire par un flux moyen.

L'évaluation des ressources sur cette base n'est donc pas indépendante de la connaissance des utilisations (non seulement présentes mais historiques) auxquelles on cherche à les comparer.

- Enfin, en région méditerranéenne et surtout sous climat semi-aride ou aride, les écoulements sortants naturels, peuvent être inférieurs à la somme des écoulements produits localement (dans les zones amont des bassins) par suite de déperditions par évaporation non négligeables en cours d'écoulement, notamment dans les basses vallées : un endoréisme fonctionnel relatif (cf. "l'effet RESEDA"<sup>14</sup> mis en évidence par E. Leblois) affecte beaucoup de bassins méditerranéens, surtout au Sud et à l'Est, où il s'ajoute aux consommations anthropiques.

Les ressources en eau naturelles de la plupart des pays méditerranéens (au Nord comme au Sud) exprimées en flux moyen annuel et évaluées suivant cette approche :

- se réfèrent rarement à une durée homogène et explicite ;
- incorporent, pour une part généralement non explicite, des écoulements non mesurés et estimés souvent de manière très simple et approximative (extrapolation de coefficients d'écoulement ou d'écoulement par unité de surface locaux...) ;
- ne prennent pas toujours en compte les écoulements souterrains sortants ;
- sont souvent chiffrées sur la base d'écoulements de surface sortants réels non corrigés des influences humaines ;
- ne prennent pas en compte les pertes d'écoulement naturelles intérieures aux bassins.

Cette approche, "par l'aval" peut donc conduire à la sous-estimation des ressources naturelles constituées par les apports.

---

<sup>14</sup> Réduction Significative des Écoulements Disponibles vers l'Aval".

## 2- L'APPROCHE PAR MODELISATION

Une approche plus moderne consiste à calculer les apports intérieurs par modélisation, sur la base de données hydroclimatiques (précipitations moins évapotranspiration réelle, autrement dit "précipitations efficaces"), en leur ajoutant les éventuels apports extérieurs réels mesurés ou estimés, comme dans l'approche précédente.

Ella a pour avantage une couverture complète et homogène du territoire (en fonction du moins du réseau de mesures) ainsi que la possibilité de se référer à des historiques de données homogènes et de longue durée (30 à 50 années), les chroniques climatologiques disponibles étant généralement plus longues et plus continues que les chroniques hydrologiques. Cette approche est en principe indépendante des données hydrologiques et est donc à priori affranchie du problème des influences. Enfin, le potentiel d'écoulement ("production" d'eau) calculé par unité de surface intègre le ruissellement et l'apport aux aquifères (éventuellement séparables).

L'expression cartographique des résultats permet de chiffrer l'écoulement produit pour tout bassin comme pour l'ensemble d'un territoire en année moyenne ou toute année particulière (notamment en année de sécheresse de fréquence donnée).

Cette approche se développe dans plusieurs pays d'Europe, notamment en Espagne et en France (cf. encadré 1), et pour un exercice à très petite échelle, pour l'ensemble de l'Union européenne à l'initiative d'Eurostat (1998), par l'Institut d'Hydrologie britannique, avec des mailles de 100km<sup>2</sup>

Encadré 1.

Caractéristiques de modélisation d'écoulement pratiquées sur l'ensemble d'un pays :		
	Espagne (1)	France (2)
Maillage spatial	Mailles kilométriques (~500 000)	Mailles cantonales (3 600)
Période de référence	1940/1941 – 1995/1996 (56 années)	1946/1947 – 1995/1996 (50 années)
Pas de temps de calcul	mois	mois
N stations climatologiques	~ 10 000	1500
N bassins locaux d'étalonnage	100 (25 années)	--
Méthode de calcul d'ETP	Thornthwaite & Penman et Monteith	Turc
Gamme des réserves utiles du sol	40-300 mm	50-250 mm
(1) Libro Blanco del Agua en España. Ministerio de Medio Ambiente. (2) Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Direction de l'eau, J.C. Schérer (1966, 2000).		

La fiabilité de cette approche est cependant subordonnée à la représentativité du modèle, à la finesse du maillage spatial et à la méthode de régionalisation des données de station, au pas de temps adopté pour les calculs (en climat méditerranéen un pas de temps journalier est préférable), ainsi qu'à la validité des hypothèses sur les paramètres du modèle de synthèse des écoulements locaux (notamment la réserve utile maximale du sol). L'ajustement de ces paramètres est généralement facilité par la reproduction d'écoulements mesurés dans des bassins-témoins de taille modeste (1000-10 000 km<sup>2</sup>), à régime considéré naturel ou valablement désinfluençable.

### POUR CONCLURE

Les principaux avantages et les inconvénients respectifs des deux approches peuvent être récapitulés comme suit :

	Avantages	Inconvénients
Approche « hydrométrique » classique	Priorité aux mesures directes	Difficultés d'homogénéiser les périodes de référence, d'extrapoler aux bassins sans mesure, de corriger les débits influencés.  Approche par l'aval négligeant les pertes d'écoulement naturelles.
Modélisation des apports	Données de base produites par un réseau plus dense et sur une plus longue durée.  Homogénéité spatio-temporelle mieux assurée. Indépendance par rapport aux influences des utilisations.	Représentativité inégale des modèles. Incertitudes sur les paramètres et leur régionalisation.

En pratique les deux approches ne sont pas complètement exclusives :

- L'approche hydrométrique n'exclut pas des modélisations locales pour des extensions de données dans l'espace et/ou dans le temps.
- La modélisation nécessite un minimum de données hydrologiques relatives à des bassins non influencés (ou à l'influence bien identifiable) pour ajuster les paramètres structuraux).

Le débat reste néanmoins ouvert entre les préférences à donner à deux sortes d'incertitude : celles inhérentes à la modélisation et celles dues aux difficultés de correction et d'extension des débits réels mesurés.

Il paraît souhaitable que les hydrologues des pays méditerranéens qui participent à l'évaluation des ressources en eau nationales et régionales dans chaque territoire parviennent à un consensus pour améliorer l'homogénéité des chiffrages.

De toute façon une présentation des données hydrologiques sous forme de tableau "entrées-sorties", comme celui proposé ici pour le bassin méditerranéen (tableau 1), est peut-être la meilleure voie pour éviter de confondre les apports et les écoulements, et pour laisser le choix aux évaluateurs. Les recommandations d'Eurostat pour l'établissement des statistiques sur les ressources en eau (1998,2000) vont d'ailleurs dans ce sens.

## REFERENCES

- Commission européenne/Eurostat, 1998 : *L'eau en Europe. Partie I- Ressources en eau renouvelables*- Office des publications officielles des Communautés européennes, 107 p., Luxembourg.
- HABETS, F., 1998 : *Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Application aux bassins versants de l'Adour et du Rhône*. Thèse doctorat Université Paul Sabatier, Toulouse III, CNRS / Météo-France.
- Leblois, E., and E. Sauquet, 1997.- Scale effects in runoff mapping. Technical report, CEMAGREF.
- MARGAT, J., 1992.- *L'eau dans le bassin méditerranéen. Situation et prospective*. Economica, Les Fascicules du Plan Bleu, n°6, 196 p. Paris.
- MARGAT, J., and D. VALLÉE, 1999.- *The Mediterranean in figures. Water Resources and Uses in the Mediterranean Countries. Figures and Facts*. Plan Bleu, 223 p., Sophia Antipolis.
- MARGAT, J., et D. VALLEE, 1999.- *Vision méditerranéenne sur l'eau, la population et l'environnement au XXI<sup>e</sup> siècle / Mediterranean Vision for Water, Populations and the Environment in the 21<sup>st</sup> Century*. Plan Bleu-MEDTAC, document pour le Forum mondial de la Haye, Global Water Partnership. Conseil Mondial de l'Eau. 62 p., Sophia Antipolis.
- MENENDEZ, M., & T. ESTRELA, 2000.- *Proposed Methodology on the calculation of fresh water resources*. Pilot Study: Selection of precipitation, inflow and outflow networks in Spain. EC/Eurostat, Working Group "Statistics of the Environment – Water Statistics". 19-20 June 2000. In "Proposals for water quantity definitions and calculation recommendations for the Eurostat / OECD Joint Questionnaire 2002".
- SCHERER, J. C. 1996, 1999, 2000.- Documents cartographiques sur les précipitations efficaces en France. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'environnement, Direction de l'eau, Paris.
- Anonyme, 1998.- *Libro blanco del agua en España*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

# OUTSTANDING FLOODS IN ROMANIA - A COMPARISON WITH THOSE OCCURRED IN THE MEDITERRANEAN REGIONS

Stanescu V. A.

*National Institute of Meteorology and Hydrology*

*Sos. Bucuresti-Ploiesti 97, Bucharest 71552, Romania*

*Stanescu@meteo.inmh.ro*

## ABSTRACT

The peculiarities of meteorological and orographical features causing floods both over extended areas and the flash floods are considered. The magnitude of floods expressed in terms of their peak discharges (recorded or reconstructed) is described and compared with statistical synthetic values. A regionalization of time-to-peak interval is performed. This allows establishing the limits of the basin areas for which the lead-time of flood forecast is long enough. Special references are made on the flash floods, their causes and potential of occurrence as well as their magnitude. Considering about 300 outstanding floods (both recorded and historical ones) that occurred in the European countries around Mediterranean Sea, a comparison with the Romanian floods is presented. This analysis allows to estimate the flood potential around Mediterranean regions and to heighten the capabilities to estimate the project floods and the flood forecast accuracy.

Key words: rainstorm; rain intensity; peak discharge; flash flood; flood forecasting; time to peak; lead-time; trigger level.

## METEOROLOGICAL CAUSES.

Meteorological conditions which generate the high floods in Romania might be of the following two types:

- Inputs of warm air masses, sometimes of tropical origin coming across the Mediterranean Sea that has as effect a considerable increase of the wet contents of the atmosphere. These types of air masses having a pronounced thermodynamic instability are manifested by vertical ascendant movement that lead to the condensation of "cumulus" type followed by intense precipitation across large areas. The abundance of rainfalls is especially favored by cold fronts originating from Atlantic Ocean which transform the southern circulation into a western one.
- Cyclonic nucleus of "cut-off " type, located at the western boundary of the country. Under these circumstances, the territory of Romania is found in the anterior part of that nucleus where there are conditions of the development of a heavy south-south-western circulation. The late, facilitates a continuous advection of tropical and wet air masses that are corroborated with an orographic ascendance due to the Southern Carpathians. The combined effect of these circumstances result in a heavy cumulation that leads to the abundant rainfalls over large areas.

## OUTSTANDING FLOODS OVER LARGE BASIN AREAS.

### Main features.

During the 1950-2000 period with systematic flood records and discharge measurements, very heavy floods occurred across large basin areas from Romania. The most severe floods have been recorded in eighties and in the last decade. In the Figure 1 the basin areas affected by the heaviest floods are shown. The floods that occurred during the period 12-15 May 1970, 1-3 July 1975 and 10-12 March 1981 are among the greatest ones.

*The 12-15 May 1970 flood* covered the central part and the northern area of the country. The rainfalls covered about 50000 km<sup>2</sup> basin area at an average rate of 120-150 mm in 72 hours. The antecedent humidity of soil was very high as a result of snowmelt combined with prior precipitation. Mostly, the frequency of the peak discharges was found between 1/50 to 1/200 years.



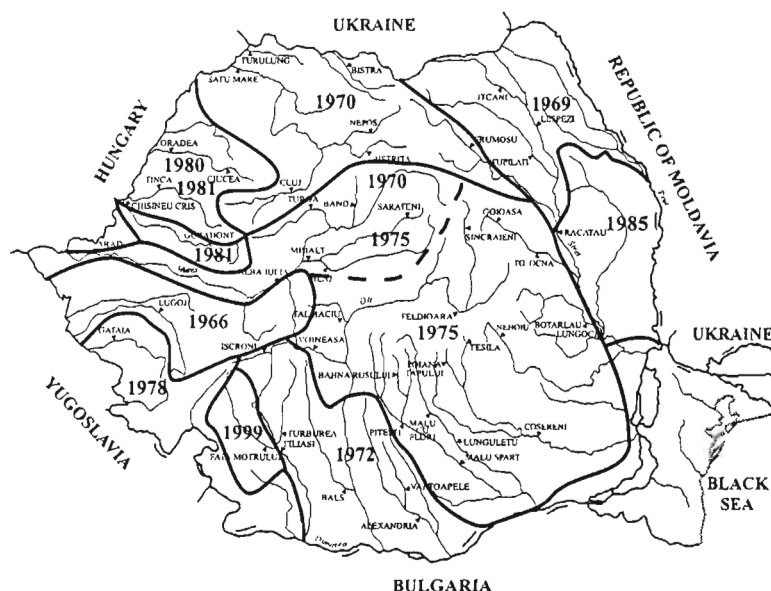


Fig. 1. River basin areas affected by major floods in Romania

**The 1-3 July 1975 flood** covered about 60000 km<sup>2</sup> basin area encompassing the south and south-eastern river basins of Meridional Carpathians, the curvature zone of Carpathians as well as an important area of the center of the country. The flood has been produced by two rainfall nucleus of 10 hours each, the first having a mean magnitude of 40-60 mm contributing to make the soil very wet and the second of more than 100 mm was the triggering cause of the flood. A special characteristic of this flood was the high gradients of increasing limb of the waves due to the torrential character of the rainfall having a maximum intensity more than 40-50 mm/hour. Thus, within the affected area flash floods occurred over small basins. The frequency of the July 1975 flood was between 1/50 to 1/100 years. (Stanescu et. al., 1976)

**The 10-12 March 1981 flood** is of a mixed origin type. Under the circumstances of an existing thick depth of snow, a sudden increase of the air temperature up to 10°C during night and due to heavy rains exceeding 100 mm in 24 hours, this flood covered a significant part of western and central territory of the country. The frequency of the peak discharges was comprised between 1/100 – 1/150 years.

Very frequent floods that occurred over all the territory of Romania have characterized **the last decade**. Among them the **1998 floods** are the most severe ones. During almost the entire half of the year 1998, significant floods have produced across Romania, the most affected areas being the central, western and northeastern zones of the country. Important increases of river discharges with significant surpassing of the water level inundation thresholds have recorded over basin areas of about 80000 km<sup>2</sup> which represent almost a third part of the territory of Romania. The peak discharges reached exceptional values both on the large rivers and the small ones (flash floods). During 17-20 June abundant rainstorms having amounts of 60-125 mm. of rainfall in the central parts of the country and more than 60-80 mm. in the eastern zones were recorded. Orographic rainstorms of unusual intensities were developed in the frame of these frontal fields of precipitation which resulted in high flash floods occurred over small basins. Over 15 flash floods having exceptional peak discharges of 1/50-1/150 year - frequency have been recorded at the hydrological stations and many have been noticed on the ungauged small rivers.

Although the last decade floods were not as heavy and large areas distributed as those occurred in eighties they are remarkable by their special attributes:

- Exceptional frequencies lied between 1/50 to 1/200 years over quite limited river basins areas (10000-20000 km<sup>2</sup>) in 1997, 1998, 1999 and 2000;
- High frequencies between 1/10 to 1/50 years over large areas (40000-50000 km<sup>2</sup>).
- Very numerous severe flash floods developed in small basins produced by local heavy rainstorms that brought about immense damages and lost of human lives.

Although it is difficult to define and objectively quantify the frequency of the flood occurrence, the general perception has been that, as compared with the past, the last decade floods have been more frequent, especially in the central and western zones.

### Efficiency and effectiveness of the flood forecast.

Considering the chain of the activities implied in the non – structural actions for flood defense and the relationship between time - to - peak and the basin area, it is possible to evaluate the lower limit of the basin area under which the forecast efficiency and effectiveness become low. It has been ascertained that rainfalls of 6-8 hours duration provoke the most floods occurring in average sized basins (2000-3000 km<sup>2</sup>). Under the circumstances of non-automatic data acquisition, transmission and concentration, an effective duration of minimum 2 hours should be added to the rainfall duration. Then, as shown in Figure 2 the duration for hydrological information  $\Delta T_{inf}$  equals 8-10 hours. The data introducing into computer and the forecast model applying take a span of time  $\Delta T_{elab}$  =1 hour and the time needed for flood forecast dissemination to the users is  $\Delta T_{dis}$  =1 hour. Thus, it results that the total duration of the flood forecast achievement and its dissemination is  $\Delta T_{for}$  =10-12 hours. On the other hand, a statistical analysis of the distribution of the ratio between the discharge corresponding to the inundation level and the 1/10 year frequency peak discharge shows that this ratio is encompassed in the range 0.5 to 0.7 with a mean value of 0.6. Then, assuming a linear variation of the flood wave increasing limb the time to inundation level is  $\Delta T_{inund} = 0.6 T_{incr}$ . In order to take the alarm decision and to warrant the needed measures for flood defense actions a minimum time of  $\Delta T_{action}$  =1-2 hours is requested. Consequently, for an efficient and effective forecast of a significant flood (at least 1/10 - year frequency) the following condition should be accomplished:

$$0.6T_{incr} \geq \Delta T_{for} + \Delta T_{action} = 11 - 14 \text{ hours} \quad (1)$$

$$\text{or:} \quad T_{incr} \geq 18 - 22 \text{ hours} \quad (2)$$

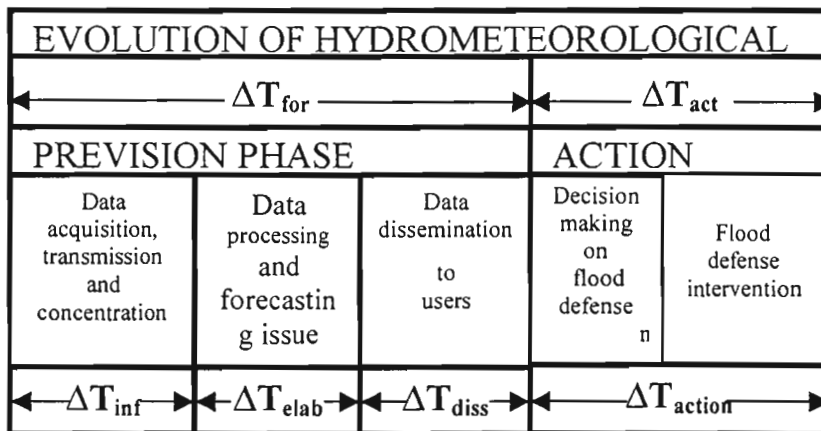


Fig. 2. Non-structural activities for flood defense

A relationship between the average value of the time - to - peak ( $T_{incr}$ ) and the basin area  $F$  (km<sup>2</sup>) is considered. Although such relationships are approximate since they are defined by a quite large range of variation of  $T_{incr}$  for a given value of  $F$ , they are nevertheless useful for estimating the flood forecasting capabilities in terms of the river basin magnitude. For different regions of the country such domains of variation of  $T_{incr}$  function of  $F$  have been assessed as shown in Figure 3. Mention is made that the estimate of  $T_{incr}$  represent the average of the increase time values belonging to the most significant flood waves recorded at a certain station. Considering the average value of  $T_{incr}$  =20 hours (relation (2) and the relationship between  $T_{incr}$  and the basin area  $F$  the lower limits of the area, for which the flood forecast is efficient are shown in Table 1.

In case of an automatic system of data acquisition, transmission and concentration is available, the needed  $T_{incr}$  diminishes to 15 hours and the limit areas are substantially reduced as shown in Table 1. The lead-time might be even larger if the flood forecast is based on meteorological forecasting model (as for

example ALADIN) and the accuracy is improved if an up-dating procedure is used. These new forecasting technologies are nowadays tested in the Romanian Hydrological Forecasting Service.

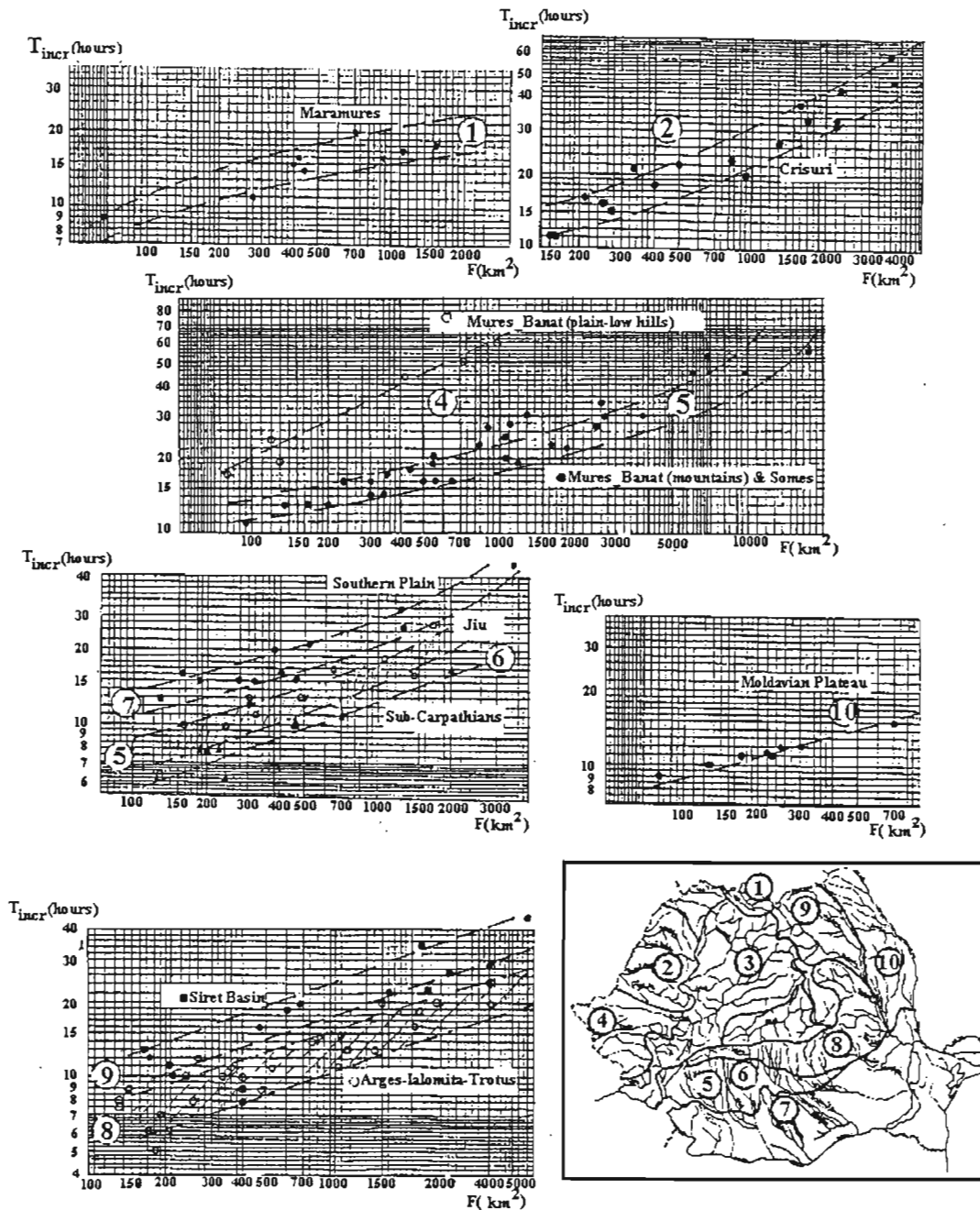


Fig. 3. Regionalization of the relationship between  $T_{incr}$  and the basin area

TABLE1. Requested lower limits of the basin area for an efficient flood forecasting

Region	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{non-automatic}$ $F(km^2)$	800	600	900	300	1500	2500	600	3000	1000	1500
$f_{automatic}$ $F(km^2)$	300	300	400	200	800	1300	300	1300	400	500

## FLASH FLOODS.

The regions the most affected by flash floods are found in the sub-mountainous zones of the Meridional Curvature Carpathians where there is an orographic ascendance of the air masses and during the summer season there is a thermal convection superposed on the dynamic convection. Nevertheless, the flash floods could occur across all the regions of Romania from the mountainous zones to the plateau and even in the plain areas. An example is the plain region of Dobrogea contiguous to the Black Sea. There, the cyclogenesis of the sea together with the high degree of relief fragmentation (the late resulting in many small sized basins) are favorable factors for heavy flash floods.

In figure 4 the isohyetes of the 21-23 June 1979 rainstorm recorded in the upper part of the Arges River Basin are presented. In the maximum nucleus having an intensity of 260 mm /2hours such rainstorm was responsible of an outstanding flash flood occurred over Potopu Basin ( $F=196 \text{ km}^2$ ) reaching a peak discharge of  $870 \text{ m}^3/\text{s}$ .

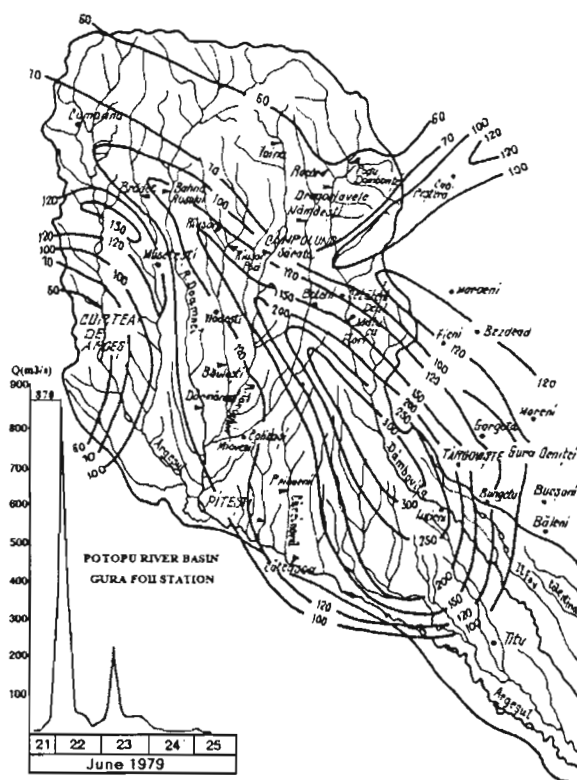


Fig. 4. The flash flood of 22 June 1979

(i.e.  $4400 \text{ l/skm}^2$ ). This discharge has a frequency of 1/200 – 1/500 years. In Table 2 the outstanding rainstorms recorded in Romania and in Table 3 the catastrophic flash floods and the magnitude of originating rainstorms are presented.

TABLE 2. Outstanding rainstorms recorded in Romania

Date	Location	Depth of rainstorm (mm)	Duration
29/30.08.1924	Casimcea-Constanta	650	24h
29/30. 08.1924	Sulina	341	24h
07.07.1889	Curtea de Arges	226.3	24h
10.06.1901	Surdila-Gaiseanca	266	24h
29/30.08.1924	Letea-Tulcea	691	16h
30.08.1924	Caraomer Constanta	320	4h
30.08.1924	Sarichioi-Tulcea	243	3-5h
29/30. 08.1924	Sulina	239.5	3-4h
17.08.1900	Caraomer-Constanta	300	4h 13min.
14.06.1889	Radeni-Botosani	122	4h 30min.
10.06.1901	Surdila-Gaiseanca-Braila	200	4h 25min.
21.06.1979	Lucieni-Dambovita	260	2h
28/28. 07.1991	Livezi-Bacau	149	2h 30min.
12.07.1999	Lunca Tomeasa	136	2h
27.05.1897	Piria-Mehedinti	145.2	2h 30min.
02.06.1897	Piria-Mehedinti	98	2h
28/29.07.1991	Lucacesti-Bacau	95.5	2h
21.06.1979	Tatarani	256	2-3h
07.07.1889	Curtea de Arges	204.6	20min.
02.06.1897	Piria-Mehedinti	180.5	35min
09.06.1999	Laslea-Mures	52	30min.
29.07.1991	Solont-Bacau	56.1	20min.
24.06.1889	Cuzganu-Constanta	80	30min.
02.08.1997	Paltinu-Prahova	35	15min
28.06.1889	R.Sarat	35	6min

## COMPARISON OF THE FLOODS OF MEDITERRANEAN COUNTRIES.

Considering about 300 outstanding historical floods (recorded or estimated by hydraulic computation), produced in the European countries around Mediterranean Sea, a comparison with the Romanian large floods has been performed. The data have been collected from international catalogues of very large floods (Kikkawa and Stanescu 1978), (Rodier and Roche, 1984) as well as from several publications. Concerning the flash flood potential, the Romanian floods are lower with 50-70% than those recorded over areas less than 100 km<sup>2</sup> in France and Italy but rather equal to those of Spain and slightly higher than those of Bulgaria, Croatia, Portugal and Yugoslavia (Figure 5). As it is shown in Figure 6 the upper envelope curves of the specific peak discharge against the basin area are those occurred in France and Italy. It has been found that for medium - size and large basins the Romanian floods are half of those of France and Italy.

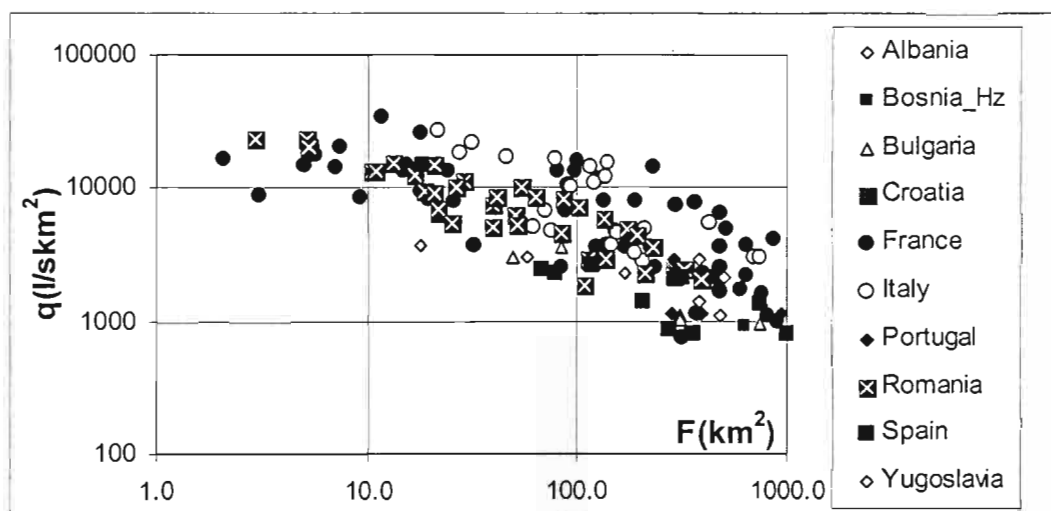


Fig. 5. Comparison of the flash floods in the Mediterranean Regions

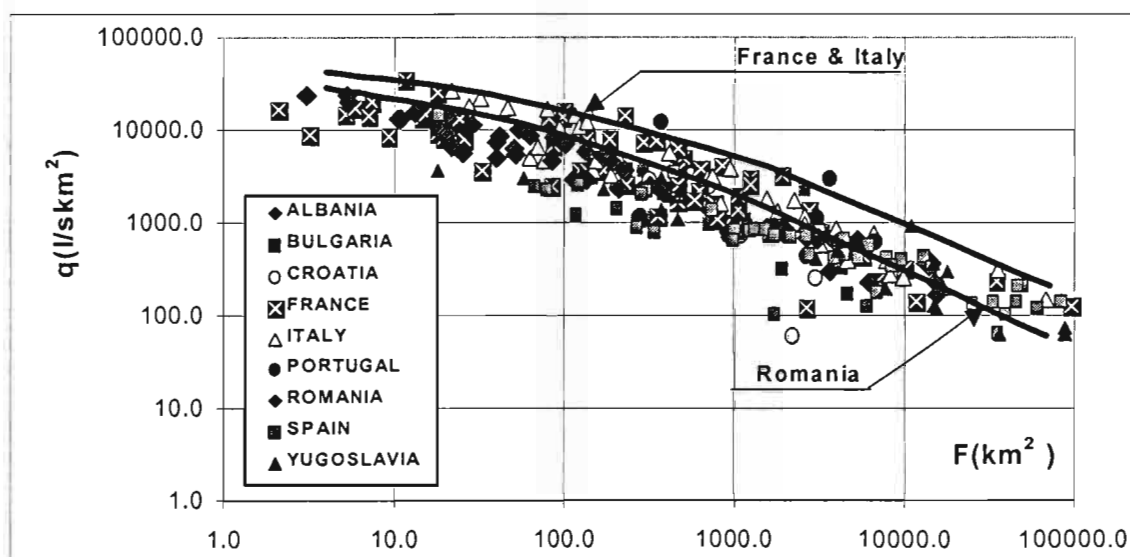


Fig. 6. General comparison of floods in the Mediterranean Regions

## CONCLUSIONS.

The occurrence of the large and severe floods allowed to achieving a rich experience in the activity of flood forecasting and warning.

Under the circumstances of a hydrological network that is partially equipped with automatic facilities of data acquisition, transmission and processing, the flood forecasting based on the records of the rainfall is considered efficient provided that the basin area should exceed limit values which vary between 600-3000 km<sup>2</sup>. These limits are function of the specific regions of the country. In case of a full automatic data collection, transmission concentration, processing and forecast dissemination and the quantitative rainfall forecast is used, these basin area limits considerably diminish.

A comparison of the flash flood potential of the European countries and that of Romania has shown that the floods occurred in France and Italy are larger with 50-70% than those of Romania, while for medium-sized and large basins this ratio is comprised between 200-250%. The other European countries around the Mediterranean Sea show values of the specific peak discharge that are close to those recorded in Romania.

## REFERENCES.

- KIKKAWA, H & STANESCU, V. Al. (1978) World Catalogue of Very Large Floods. *UNESCO Press*.
- RODIER, J., A. & ROCHE, M. (1984) World Catalogue of Maximum Observed Floods. *IASH Publ. No 143*.
- STANESCU, V., Al., SERBAN P., MANOLIU M. (1976) Caracteristicile hidrologice ale scurgerii maxime pluviale din iulie 1975 pe raurile din bazinul Arges (Hydrological Characteristics of Maximum Flow of July 1975 in the River Basin Arges). *Studii si Cercetari de Hidrologie Vol XLV, IMH, pp. 63-104, Bucharest*.

# CONTRIBUTION A L'ANALYSE DE LA VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE DU BASSIN MEDITERRANEEN

BIDI F\*, SERVAT E\*, NIEL H\*.

*IRD (Institut de Recherche pour le Développement, Montpellier, France)*

## INTRODUCTION

Le Bassin Méditerranéen est, comme d'autres régions de la planète, soumis aux conséquences de la variabilité et de l'évolution du climat. Il se caractérise globalement par des ressources en eau souvent inégalement réparties et qui constituent, par endroits, de véritables enjeux politiques au regard des fortes sollicitations qu'elles subissent. A l'heure actuelle, compte tenu du développement de cette région, de la forte densité de population et de l'activité qui lui est associée, l'équilibre « ressources-besoins » est un pari parfois difficile à tenir.

Il est donc nécessaire d'approfondir la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des régimes hydrologiques en région méditerranéenne au moyen d'ensembles de données régionales.

Cette étude, centrée sur l'analyse et la caractérisation précise des manifestations de la variabilité pluviométrique en milieu méditerranéen, qui a donné lieu à la soutenance d'un DEA (Bidi, 2000) auquel nous renvoyons pour une présentation plus exhaustive (et une approche bibliographique complète), est une contribution à l'analyse de cette variabilité spatiale et temporelle essentielle dans le Bassin Méditerranéen.

## DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Les données utilisées dans le cadre de cette étude ont été extraites de la base de données « Séries longues » du Projet FRIEND AMHY (cadre dans lequel ce travail s'est effectué) alimentée grâce aux travaux de Pierre Hubert, et de la banque de données du GHCN (Global Historical Climatology Network).

Malgré cela, la densité des points de mesure reste inhomogène à l'échelle du Bassin Méditerranéen, ce qui nous conduira à émettre certaines conclusions avec circonspection.

## METHODOLOGIE

L'exploitation des données s'est effectuée de plusieurs manières qui se sont révélées complémentaires.

Une approche en statistiques descriptives, suivie d'une analyse des séries chronologiques de pluviométrie annuelle destinée à mettre en évidence des ruptures et, enfin, une représentation cartographique des résultats ont été utilisées pour étudier la variabilité spatio-temporelle des précipitations des régions méditerranéennes.

Les analyses de ruptures ont été effectuées à l'aide de KhronoStats, logiciel développé dans le cadre du programme ICCARE mené à l'IRD.

## RESULTATS

### Statistiques descriptives, détection de ruptures, ACP

L'approche descriptive montre deux périodes majoritairement sèches dans tout le bassin méditerranéen : les années 1940 et les années 1980. La recherche de ruptures, quant à elle, met en évidence un événement particulier affectant la fin des années 1930 et le début des années 1940. Cette rupture est principalement marquée dans la partie ouest du Bassin.

Les différentes méthodes utilisées ont également permis d'identifier plusieurs périodes humides : 1913-1917, la fin des années 1960 et les années 1970.



## Analyse cartographique par décennies

Cette analyse est basée sur le calcul d'indices pluviométriques par décennies et sur leur représentation cartographique. La faible densité spatiale des séries longues disponibles n'a pas permis d'utiliser une cartographie basée sur l'interpolation et les résultats obtenus concernent les variations locales des postes étudiés.

Au cours des six dernières décennies, les représentations et analyses confirment l'existence de deux périodes très déficitaires : la décennie 1940, pour laquelle la sécheresse est très marquée en Europe et en Afrique du Nord, et la décennie 1980 qui est moins accentuée pour ce qui est de cette dernière région.

Par ailleurs, ces études ont souligné les contrastes qui existent entre les différents secteurs du Bassin Méditerranéen. Sur la quasi totalité de la période étudiée, on observe une opposition entre parties orientales et occidentales de la région, ainsi que, très souvent, entre Nord et Sud du Bassin.

## CONCLUSIONS

Pour l'ensemble des résultats et les nombreuses représentations cartographiques qui les accompagnent, nous renvoyons au DEA de F. Bidi soutenu à l'Université de Montpellier en juillet 2000.

Un nombre relativement réduit de séries chronologiques a pu être utilisé pour cette étude. Au maximum, 80 stations se sont révélées disponibles sur l'ensemble du bassin. Bien évidemment, malgré l'emploi de méthodes diverses et complémentaires, cette faible disponibilité des données a souvent limité la portée de nos investigations (notamment d'un point de vue cartographique).

Les résultats obtenus doivent donc être examinés avec attention sans, toutefois, que les indications qu'ils fournissent puissent être globalement contestées.

L'alternance de périodes excédentaires et déficitaires, observée à travers différentes méthodes, a mis en évidence la variation temporelle des précipitations en milieu méditerranéen. Les fluctuations les plus brutales et les plus significatives ont été observées autour des années 1940 et 1980.

Cette étude a également permis d'identifier une variation spatiale des précipitations à l'échelle du Bassin méditerranéen, en particulier sous la forme de contrastes Nord-Sud et Est-Ouest.

Il conviendrait de compléter ce travail de diverses manières :

- prise en compte d'un pas de temps mensuel ou saisonnier qui permettrait une étude et une caractérisation plus fine de la variabilité pluviométrique en milieu méditerranéen ;

- analyse au pas de temps journalier ou à celui de l'événement pour travailler sur les phénomènes de forte intensité dont les conséquences sont parfois dramatiques dans les régions méditerranéennes ;

- prise en compte d'autres paramètres climatiques ou hydrologiques (température, évaporation, humidité, débits, etc.) afin d'affiner et de compléter les éléments de variabilité déjà mis en exergue.

## REFERENCES

Bidi F., 2000. « Contribution à l'analyse de la variabilité pluviométrique du bassin méditerranéen ». DEA soutenu le 11/07/00 à l'Université Montpellier II.

# ETUDE DE L'EVOLUTION DES SERIES PLUVIOMETRIQUES DE LA TUNISIE CENTRALE

Kingumbi A.\*, Bergaoui Z. \*, Bourges J.\*\*, Hubert P.\*\*\* et Kallel R.\*\*\*\*.

\* *Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) BP 37 Le Belvédère 1002 Tunis.*

\*\* *IRD Mission Tunisie BP 434 El Menzah 1004 Tunis.*

\*\*\* *Ecole des mines de Paris - C. I. G. 35, rue Saint Honoré 77305 Fontainebleau*

\*\*\*\* *Ministère de l'Agriculture - DGRE Tunis.*

## RESUME

L'étude de la pluviométrie annuelle de la Tunisie centrale par la méthode de la variable centrée réduite a mis en évidence une certaine baisse de la pluviométrie entre 1976 et 1989. Cependant en utilisant des tests statistiques, il n'a pas été montré de rupture de stationnarité dans les séries chronologiques considérées. Par contre, l'étude de la persistance temporelle des classes de pluies a montré une baisse très significative des pluies supérieures à 30 mm après 1976.

## MOTS CLES

Précipitations, Tunisie centrale, rupture de stationnarité, persistance temporelle.

## INTRODUCTION

Les apports de l'oued Merguellil ont connu une baisse assez significative ces dernières années. Sans tenir compte de l'année exceptionnelle 1969-1970, les apports moyens interannuels aux stations de Haffouz et Sidi Boujdaria ont été estimés respectivement à 16.7 millions de m<sup>3</sup> (1966-1982) et à 32 millions de m<sup>3</sup> (entre 1974-1982) (Bouzaïane & Lafforgue, 1986). Dans une étude plus récente effectuée sur la période après la mise en place du barrage d'El Haouareb (Kingumbi A., 1999), le volume d'apports moyens interannuels à ce barrage est évalué à 23 millions de m<sup>3</sup> (1989-1998). La comparaison entre ces mesures aux différentes stations hydrométriques, Haffouz (675 km<sup>2</sup>), Sidi Boujdaria (890 Km<sup>2</sup>) et El Haouareb (1200 km<sup>2</sup>)(fig. 1), montre que le module moyen de cet oued a considérablement baissé ces dix dernières années.

Deux facteurs peuvent contribuer à la baisse de la réponse de ce bassin ; d'une part la diminution des précipitations, objet de cette étude, qui peut être une conséquence de la variabilité climatique, et d'autre part le facteur anthropique qui se manifeste par l'implantation d'aménagements hydrauliques divers et un accroissements de surfaces cultivées.

## DONNEES

La région d'étude se situe dans deux gouvernorats (Kairouan et Siliana) de la Tunisie Centrale (fig. 1). Les stations pluviométriques sélectionnées sont au nombre de 8, il s'agit de Kairouan, Sidi Saad, Haffouz, El Ala, Skhira, Kesra, Ouslatia et Sidi Hamada. En vue de comparer l'évolution pluviométrique de la Tunisie Centrale à celle d'autres régions du pays, deux stations ont été aussi traitées : l'une au nord (Tunis) et l'autre au sud (Gafsa). Chacune des stations sélectionnées a une durée supérieure ou égale à trente années d'existence à l'exception de la station de Skhira qui n'a que vingt cinq années.

Quinze variables ont été calculées à partir de la pluie journalière de chaque station. Il s'agit de la pluie annuelle, les pluies saisonnières et leurs contributions au total annuel, le nombre de jours de pluie supérieure à un seuil choisi (0 mm, 5 mm, 10 mm et 30 mm), le cumul des pluies supérieures à 30 mm et la contribution de ces pluies au total annuel.

## VARIABILITE ET CHANGEMENT CLIMATIQUES

Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté mondiale à s'intéresser aux changements climatiques et à leurs conséquences socio-économiques. Parmi ces manifestations on peut citer la sécheresse qui a touché les deux bandes tropicales de notre planète (surtout les régions sahéliennes d'Afrique de l'ouest) depuis les années 70 (Sircoulon, 1976), les récents phénomènes d'El niño (Vandiepenbeeck M., 1998) et les constatations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) sur le réchauffement de la planète de 0.5 °C depuis la moitié du siècle dernier (Cantat O., 1995).

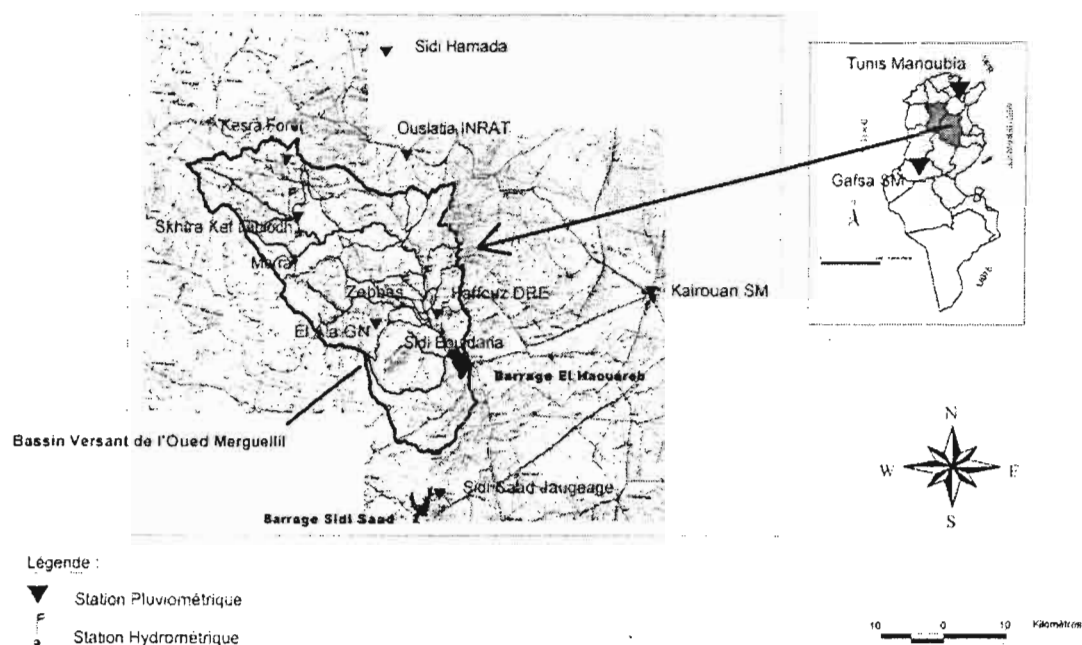


Fig. 1: Situation et carte du bassin versant du Merguellil

Parmi les résolutions prises il y a la mesure précise des fluctuations et leur interprétation statistique. Dans ce cadre plusieurs méthodes de détection des changements climatiques ont été mises au point (WMO, 1966 ; Lubès H. *et al.*, 1994 ; Cavadias, 1994).

Les changements climatiques supposent la dégradation à long terme des valeurs moyennes des caractéristiques statistiques des variables étudiées sur des périodes de longue durée. Cette notion diffère de la variabilité climatique qui suppose la stationnarité et décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport aux valeurs temporelles de référence. Le cycle climatique de l'eau étant l'une des manifestations majeures du climat, son suivi permet d'appréhender certains aspects d'évolution du climat. Ainsi Mitosek indique que les variables les plus adaptées pour le suivi du climat sont (Ouarda Taha B. *et al.*, 1999) : le débit des rivières, le niveau des lacs, les précipitations, les températures de l'air et de l'eau, la date de rupture du couvert de glace et sa durée, et le niveau des eaux souterraines.

Les évolutions possibles de ces variables climatiques peuvent être ramenées à deux types de modifications à analyser : le changement de la moyenne et celui de la variance (Ouarda Taha B. *et al.*, 1999).

Par le monde de nombreuses études ont été menées pour la détection de ces changements. En Afrique sahélienne et non sahélienne beaucoup d'auteurs ont mis en évidence, à partir des séries hydro-pluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui perdure jusqu'à présent. Dans cette région, il a été constaté une diminution de la pluviométrie annuelle (Hubert et Carbonnel, 1987 ; Moron Vincent, 1994 ; Paturel J.E. *et al.*, 1995 ; Paturel J.E. *et al.*, 1997 ; Servat E. *et al.*, 1997 ; Tarhule Aondover et Woo Ming-ko, 1998 ; Servat E. *et al.*, 1999), du nombre de jours de pluie (Paturel J.E. *et al.*, 1997 ; Servat E. *et al.*, 1997 ; Houndénou C. et Hernandez K., 1998 ; Tarhule Aondover et Woo Ming-ko, 1998 ; Servat E. *et al.*, 1999), de fortes intensités de pluies (Houndénou C. et Hernandez K., 1998 ; Tarhule Aondover et Woo Ming-ko, 1998), des débits de rivières (Sircoulon, 1987 ; Opoku-Ankomah y. et Amisigo B.A., 1998), des niveaux des lacs (Sircoulon, 1987), ainsi qu'un raccourcissement de la saison pluvieuse (Bello N.J., 1998 ; Servat E. *et al.*, 1999).

Assani Ali A. (1999) a mis en évidence, à l'aide du filtre récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2, la succession de phases sèches et humides à Lubumbashi (RDC) ; la dernière phase sèche en date a commencé

vers les années 1980 et se prolonge jusqu'à nos jours. Malgré cela, avec le test de Mann-Kendall il n'a pas détecté de rupture de la stationnarité dans la série chronologique étudiée alors que les précipitations sont significativement corrélées aux indices d'oscillation australe pendant la saison de pluies.

## METHODE

En dehors de l'utilisation de la variable centrée réduite sur la pluviométrie annuelle, en vue de cerner l'évolution de la pluviométrie annuelle par rapport à la moyenne de la période considérée, deux méthodes de détection de rupture de la stationnarité des séries chronologiques ont été utilisées dans cette étude : le test de Pettitt et la procédure de segmentation des séries hydropluviométriques de Pierre Hubert.

### Le test de Pettitt

Le test de Pettitt a déjà fait l'objet de publications antérieures (Lubes *et al.*, 1994 ; Lubes-Niel H., 1998). Il consiste à découper la série principale de  $N$  éléments en deux sous séries à chaque instant  $t$  compris entre 1 et  $N-1$ . La série principale présente une rupture à l'instant  $t$  si les deux sous séries ont des distributions différentes. L'hypothèse nulle  $H_0$  de non - rupture est testée au moyen d'un test non paramétrique. Pour un risque  $\alpha$  de première espèce donné,  $H_0$  est rejetée si une certaine probabilité ( $\text{Prob}(K_N > k)$ ) calculée à partir de la série chronologique étudiée est inférieure à  $\alpha$ .

Ce test a été choisi pour son utilisation dans de nombreuses études de détection de changement de la stationnarité, sa puissance surtout en ce qui concerne le test de rupture sur la moyenne (Lubès-Niel H. *et al.*, 1998), et sa robustesse (Lubes H. *et al.*, 1994).

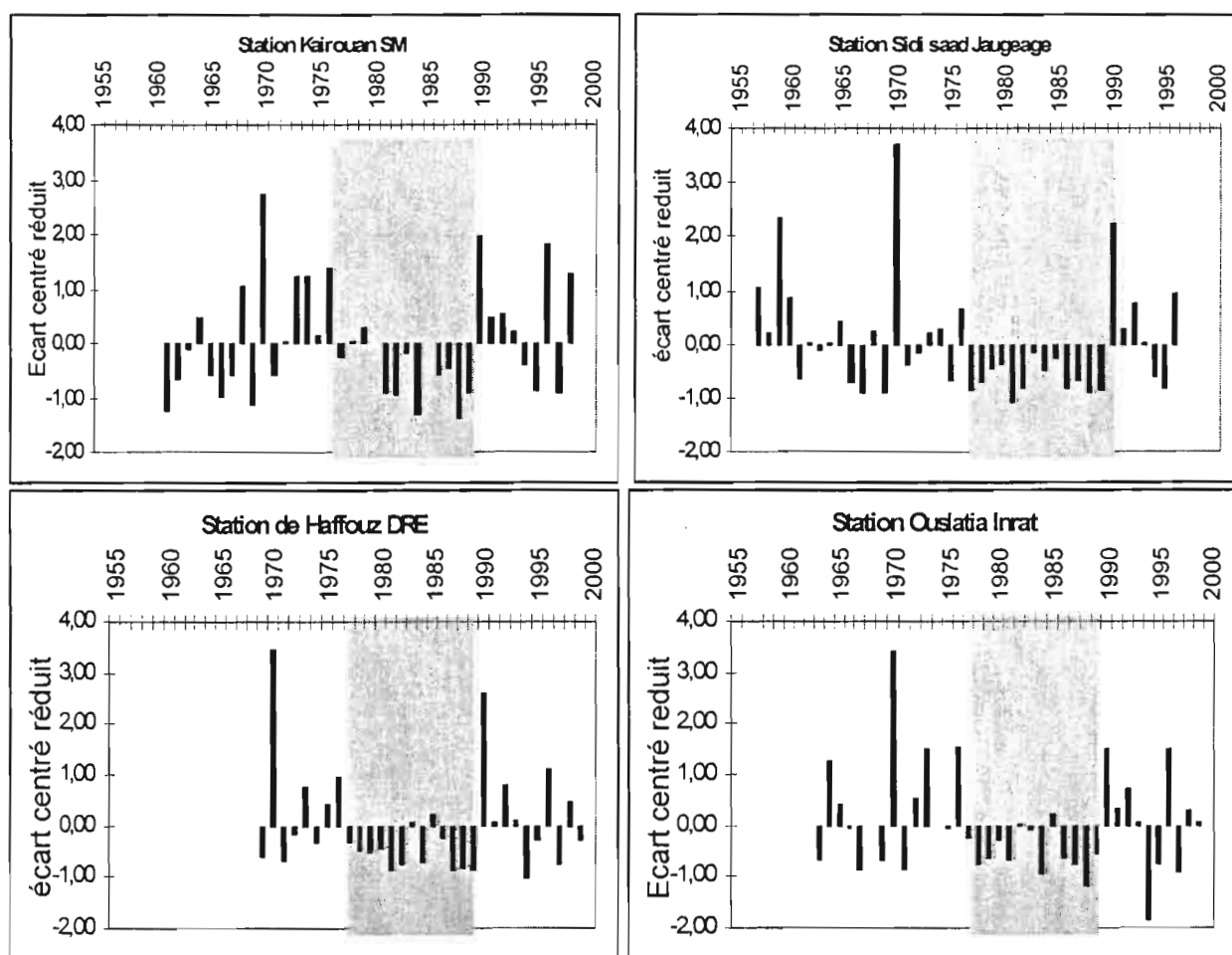


Fig. 2: Ecarts centrés réduits sur quatre stations de la Tunisie Centrale

## **La Procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques (Hubert P. et al., 1989)**

La procédure de segmentation a pour principe le découpage d'une série en  $m$  segments de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit nettement différente de la moyenne du (des) segment (s) voisin (s).

La segmentation est retenue lorsque l'écart quadratique entre elle et la série est minimum. Cette condition est nécessaire mais non suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. Il faut lui adjoindre, par application du test de Scheffé, la contrainte selon laquelle les moyennes des deux segments contigus doivent être significativement différentes.

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir rechercher des changements multiples de moyenne dans une série hydrométéorologique. Elle est considérée comme un test de stationnarité ; « la série étudiée est stationnaire » constitue l'hypothèse nulle de ce test. Elle a été utilisée dans plusieurs études de changements climatiques notamment en Roumanie (Carbonnel J.P. et Hubert P., 1994) et surtout en Afrique de l'ouest où elle a été appliquée aux séries des précipitations et des débits de cette région (Hubert P. *et al.*, 1989).

La puissance de cette procédure a été confirmée par Lubès-Niel H. *et al.* (1998) surtout au niveau de signification 0.01 du test de Scheffé. Elle s'est révélée particulièrement robuste en confirmant les discontinuités détectées initialement après l'allongement (de dix ans) des séries étudiées en Afrique de l'Ouest (Hubert P., *et al.*, 1998).

### **Etude de changement dans la persistance temporelle**

Les deux méthodes utilisées plus haut, sont adaptées à la recherche de changements éventuels de la moyenne et de la variance dans les séries chronologiques. Comme l'a démontré Bardossy (1994), les persistance spatiale et temporelle peuvent avoir une influence majeure sur le cycle de l'eau. Partant des résultats des méthodes présentées ci-dessus, une étude de la persistance temporelle des classes de pluies sera effectuée. Il s'agira de calculer la distribution des classes de pluies (entre 0 et 5 mm, 5 et 10 mm, 10 et 30 mm et les pluies supérieures à 30 mm) pour les différentes périodes de changements qui auront été détectées.

## **RESULTATS**

### **Evolution de la pluviométrie annuelle de la Tunisie centrale**

L'étude de la variable centrée réduite des précipitations annuelles a permis de dégager trois périodes (fig. 2). La première concerne les années antérieures à 1977 et correspond à une succession d'années sèches et humides. La deuxième période commence avec l'année 1977 et va jusqu'à l'année 1989, elle est caractérisée par une succession d'années sèches seulement. La période après 1989 est caractérisée par une certaine reprise pluviométrique et les successions d'années sèches et humides sont comparables à celles observées dans la première. Deux années excédentaires se dégagent particulièrement du lot, 1969-1970 et 1989-1990. La première caractérisée par les écarts qui vont parfois au delà de 4 unités est d'ailleurs considérée comme exceptionnelle dans l'histoire pluviométrique récente de la Tunisie Centrale.

Il est aussi à remarquer une persistance de faibles pluviométries annuelles entre 1977-1989, période caractérisée par une variance faible, alors que les périodes antérieure et postérieure connaissent d'importantes fluctuations (tableau 3).

### **Etude de la stationnarité des séries pluviométriques de la Tunisie Centrale**

La procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques a donné des résultats qui sont consignés dans le tableau 1. Pour les pluies annuelles, ce test montre qu'il n'y a eu aucune rupture de la stationnarité pour l'ensemble des stations de la Tunisie centrale. En ce qui concerne les totaux saisonniers, aucune rupture ne s'est non plus dégagée mis à part le poids saisonnier du printemps qui présente une certaine rupture en 1992 sur trois stations (Haffouz, Skhira et Ouslatia).

Si on s'intéresse au nombre de jours de pluie ( $> 0$  mm), on observe rupture vers les années 1976 sur cinq stations : Kairouan, Sidi Saad, Ouslatia, Kesra et Sidi Hamada. De même, la contribution des pluies supérieures à 30 mm ainsi que le cumul  $> 30$  mm présentent une rupture identique pour les stations de Sidi Saad, Haffouz, El Ala et Kesra entre 1975 et 1977.

Pour deux stations situées hors de la Tunisie centrale, il a été constaté à Tunis une rupture vers les années 1950 pour plusieurs des paramètres étudiés ; mais aucune rupture n'est mise en évidence à Gafsa.

Le test de Pettitt a été programmé sous l'environnement Turbo Pascal. En considérant un risque  $\alpha$  de 5 %, seule une rupture dans le nombre de jours de pluies ( $> 0$  mm) a été détectée en Tunisie Centrale (pour

les stations de Kairouan et Sidi Saad). Tous les résultats de ce test pour les probabilités  $\text{Prob}(K_N > k) \leq 0.5$  sont donnés dans le tableau 2. Ils montrent qu'il y aurait eu une certaine baisse, à partir de 1976, de la pluviométrie annuelle (station de Sidi Saad), des pluies d'été (station de Kairouan, Sidi Saad et Kesra), du cumul de pluies supérieure à 30 mm et de sa contribution dans le total annuel (station de Sidi Saad, Haffouz, El Ala et Kesra). Il semble aussi qu'une baisse des pluies d'automne aurait été détectée en 1992, alors que le cumul de pluies supérieure à 30 mm et sa contribution dans le total annuel (station de Kairouan et Skhira) auraient connu une hausse à partir de 1989.

De même que pour la procédure de Pierre Hubert, on remarque qu'il n'y a pas de concomitance dans les ruptures éventuelles entre les stations de la Tunisie centrale et celles de Tunis au nord et Gafsa au sud.

TABLEAU 1: Résultats de l'application de la procédure de segmentation de Pierre Hubert sur les séries chronologiques étudiées

Détection de ruptures dans les séries chronologiques par la procédure de segmentation de Pierre HUBERT										
Variable/Station	Kairouan SM (1961 - 1998)	Sidi Saad J (1957-1996)	Haffouz DRE (1969-1999)	El Ala GN (1970-1998)	Skhira KL (1975-1999)	Ouslatia INRAT (1963-1999)	Kesra Forêt (1967-1996)	Sidi Hamada (1961-1991)	Tunis Manoubia (1902-1998)	Gafsa SM (1962-1998)
Pluies annuelles	-	-	-	-	-	-	-	-	1948	-
Pluies saisonnière d'automne	-	-	-	-	-	-	-	-	1950	-
Pluies saisonnière d'hiver	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pluies saisonnière de printemps	-	-	-	-	-	1993	-	1989	1952	-
Pluies saisonnière d'été	-	1964	-	-	1988	1976	-	-	-	-
Poids saisonnier d'automne	-	-	-	-	1992	-	-	-	-	-
Poids saisonnier d'hiver	-	-	-	-	-	-	-	-	1949	-
Poids saisonnier de printemps	-	-	1992	-	1992	1992	1975	1971	-	-
Poids saisonnier d'été	-	-	-	-	-	-	1988	1969	-	-
Nombre de jours de pluie	1976	1976	-	-	-	1976	1973	1976	1922	-
Nombre de jours de pluie > 5 mm	-	-	-	-	-	-	1972	1989	1951	-
Nombre de jours de pluie > 10 mm	-	1989	1989	-	-	-	-	1989	1952	-
Nombre de jours de pluie > 30 mm	-	-	-	-	1988	-	-	-	-	-
Cumul des pluies > 30 mm	-	1974	-	-	1989	-	-	-	-	-
Contribution du cumul de pluies > 30 mm	-	1975	1976	1975	1989	-	1977	-	-	-

TABLEAU 2: Résultats de l'application du test de Pettitt sur les séries chronologiques étudiées

Détection de ruptures dans les séries chronologiques par le test de PETTITT										
Variable/Station	Kairouan SM (1961-1998)	Sidi Saad J (1957-1996)	Haffouz DRE (1969-1999)	El Ala GN (1970-1998)	Skhira KL (1975-1999)	Ouslatia INRAT (1963-1999)	Kesra Forêt (1967-1996)	Sidi Hamada (1961-1991)	Tunis Manoubia (1902-1998)	Gafsa SM (1962-1998)
Pluies annuelles	-	1976 (0.24)	-	-	-	-	-	-	1948 (0.27)	-
Pluies saisonnière d'automne	1966 (0.43)	1989 (0.50)	-	-	-	-	-	-	1948 (0.31)	-
Pluies saisonnière d'hiver	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pluies saisonnière de printemps	-	-	1992 (0.44)	-	1993 (0.09)	1992 (0.32)	-	1971 (0.45)	1951 (0.15)	-
Pluies saisonnière d'été	1976 (0.30)	1973 (0.16)	-	-	-	1976 (0.09)	-	1969 (0.16)	1949 (0.11)	-
Poids saisonnier d'automne	1976 (0.23)	1976 (0.41)	-	-	1992 (0.28)	-	-	-	-	-
Poids saisonnier d'hiver	-	-	-	-	-	-	-	-	1949 (0.22)	-
Poids saisonnier de printemps	-	-	1992 (0.14)	-	1992 (0.06)	1992 (0.23)	1975 (0.30)	1971 (0.31)	-	-
Poids saisonnier d'été	1969 (0.37)	1979 (0.32)	-	-	-	1976 (0.21)	-	1969 (0.17)	1945 (0.20)	-
Nombre de jours de pluie	1976 (0.04)	1973 (0.01)	-	-	1980 (0.14)	1986 (0.37)	1984 (0.16)	1976 (0.21)	1928 (0.00)	-
Nombre de jours de pluie > 5 mm	-	-	-	-	-	1977 (0.47)	-	-	1951 (0.01)	1987 (0.47)
Nombre de jours de pluie > 10 mm	-	1989 (0.47)	-	-	-	-	-	1981(0.27)	1951 (0.43)	1976 (0.48)
Nombre de jours de pluie > 30 mm	-	1975 (0.24)	-	1976 (0.37)	1988 (0.11)	-	-	-	1940 (0.27)	-
Cumul des pluies > 30 mm	1989 (0.18)	1975 (0.12)	1976 (0.36)	1976 (0.22)	1989 (0.18)	-	1977 (0.44)	-	-	-
Contribution du cumul de pluies > 30 mm	1989 (0.26)	1975 (0.21)	1976 (0.37)	1976 (0.23)	1989 (0.13)	-	1977 (0.32)	-	1940 (0.46)	-

( \* ) Prob( $K_N > k$ )



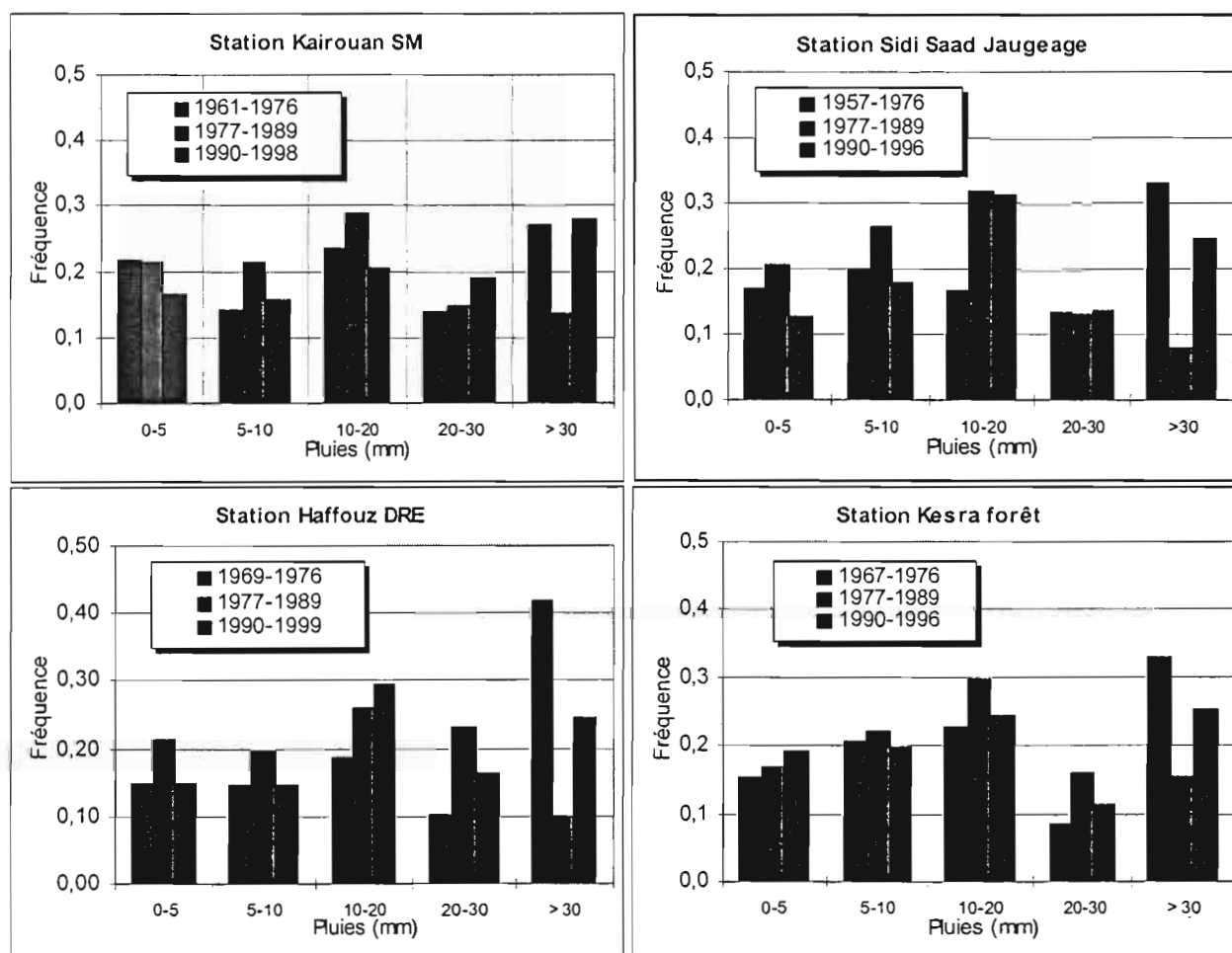


Fig. 3 : Distribution des classes de pluies journalières aux stations de la Tunisie centrale durant 3 phases successives

### Changement dans la persistance temporelle des pluies

En considérant les dates d'éventuelles ruptures qui apparaissent le plus souvent à travers les méthodes précédentes, nous avons représenté la distribution des classes de pluies journalières à différentes stations de la Tunisie centrale. Pour l'ensemble de ces stations, à l'exception d'Ouslatia Inrat, il apparaît que la contribution des pluies supérieures à 30 mm a considérablement baissé entre 1977 et 1989 (fig. 3). A titre d'exemple, pour la station de Sidi Saad elle est passée de 33 % (1957-1976) à 8 % (1977-1989), puis elle est remontée à 25 % pour la période de 1990 à 1999. Le tableau 3 donne une comparaison entre les contributions de ces pluies et les modules moyens annuels à Haffouz pour les périodes considérées.

TABEAU 3: Comparaison des caractéristiques pluviométriques et hydrométriques à la station de Haffouz

Périodes	1969-1976	1977-1989	1990-1998
Pluie moyenne (mm)	393	242	362
Ecartype (mm)	206	54	159
% pluie > 30 mm	43	10	25
Module (millions de m <sup>3</sup> /an)	39	20	23

Il ressort de ce tableau que la diminution des précipitations entre 1977-1989 a sensiblement affecté les écoulements de l'oued Merguellil durant cette même la période. La période postérieure, caractérisée par une nette reprise de la pluviométrie, n'a pas connu une augmentation aussi sensible des écoulements. Il

conviendrait d'engager une étude plus précise des précipitations pour l'affirmer, mais cette baisse des apports du bassin pourrait être due à l'influence des aménagements et de l'anthropisation qui s'est intensifiée au cours de la dernière décennie.

## CONCLUSION

L'étude des séries pluviométriques de la Tunisie centrale, par la méthode des variables centrées réduites, a mis en évidence une certaine baisse des totaux annuels entre 1977 et 1989. Les méthodes statistiques de détection de ruptures de la stationnarité dans les séries chronologiques (le test de Pettitt et la procédure de segmentation de Hubert) n'ont pas montré de rupture dans les séries de pluviométries annuelles. Par contre elles ont détecté un certain nombre de changements : en 1976 dans le nombre de jours de pluie, dans le cumul de pluies supérieures à 30 mm et dans sa contribution dans le total annuel ; en 1992 dans la pluie printanière. L'année 1989 est aussi apparue dans plusieurs variables comme une année de rupture, sans pour autant caractériser une variable spécifique sauf le nombre de jours de pluies supérieures à 10 mm. Les années 1976 et 1989 ont d'ailleurs été mis en exergue par Crisciani F. *et al.* (1994) qui a montré que la période 1977-1988 était dominée par des basses pressions et des niveaux plus hauts de la mer à Trieste (Nord de la mer Adriatique - Italie), alors que les périodes antérieures et postérieures étaient caractérisées par les phénomènes inverses.

L'étude de la persistance temporelle de quelques classes de pluies en fonction des dates de rupture détectées par les méthodes précédentes a confirmé le changement dans la contribution des pluies supérieures à 30 mm. Ces pluies qui occupent une place importante dans la production du ruissellement, ont enregistré une baisse significative (5 à 25%) après 1976, surtout entre 1977 et 1989 (10 à 35%). Ceci fait ressortir que la baisse de la pluviométrie annuelle constatée, durant cette période, en Tunisie Centrale est concomitante avec celle des pluies supérieures à 30 mm. Il ressort aussi que la reprise pluviométrique enregistrée à partir de 1990 n'a pas occasionné une augmentation équivalente d'écoulement, ce qui met en évidence l'action anthropique.

La comparaison avec d'autres parties de la Tunisie, le nord et le Sud, n'aboutit pas aux mêmes conclusions ce qui limite sensiblement la portée des résultats.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASSANI ALI .A., 1999 : Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). *Sécheresse*, 10(4), pp 245-252.
- BARDOSSY, 1994 : Statistical persistence in hydroclimatological time series. Working Paper, University of Stuttgart, pp 219-233.
- BELLO N.J., 1998 : Evidence of climate change based on rainfall records in Nigeria. *Weather*, 52(12), pp 412-418.
- BOUZAÏANE & LAFFORGUE, 1986 : Monographie hydrologique des oueds Zéroud et Merguellil. DGRE - ORSTOM - Tunis, 1058p.
- CANTAT O., 1995 : Variabilité et variation climatiques en Normandie - L'évolution récente des températures à Caen-Carpique. *Sécheresse*, 6(3), pp 273-279.
- CARBONNEL J.P. et HUBERT P., 1994 : Etude statistique de quelques séries roumaines et bulgares. Indices sur l'évolution climatique récente. *Romanian Journal of Hydrology & Water Resources*, 1(2), pp 107-113.
- CAVADIAS G., 1994 : Detection and Modelling of the impact of climatic change on river flows. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, pp 207-218.
- CRISCIANI F., Ferraro S. et RAICICH F., 1994 : Evidence of recent anomalies at Trieste (Italy). *Climatic change*, 28(4), pp 365-374.
- HOUNDENOU C. & HERNANDEZ K., 1998 : Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale). *Sécheresse*, 9(1), pp 23-34.
- HUBERT P., et CARBONNEL J.P., 1987 : Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 95, pp 165-183.
- HUBERT P., CARBONNEL J.P., et CHAUCHE A., 1989 : Segmentation des séries hydrométéorologiques - Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, pp 349-367.
- HUBERT P., Servat E., Paturel J.E., Kouame B., Bendjoudi H., Carbonnel J.P et Lubes-Niel H., 1998 : La procédure de segmentation, dix ans après. *Proceedings of the Abidjan'98 conference on the Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS Publ. n° 252, pp 267-273.
- KINGUMBI A., 1999 : Bilan et modélisation de la retenue du Barrage d'El Haouareb. Mémoire de diplôme d'études approfondies à l'ENIT, 110p + annexes.

- Lubès H., Masson J.M., Servat E., Paturel J.E., Kouame B., et Boyer J.F., 1994 : Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques - Etude bibliographique. Rapport n° 3 Programme ICCARE, ORSTOM Montpellier, 21p.
- LUBES-NIEL H., MASSON J.M., PATUREL J.E. et SERVAT E., 1998 : Variabilité climatique et statistique. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des sciences de l'eau*, 11(3), pp 383-408.
- MAHE G. & OLIVRY J.C., 1995 : Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, 6(1), pp 109-117.
- MORON V., 1994 : Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *International Journal of Climatology*, 14(3), pp 325-341.
- OPOKU-ANKOMAH y. & AMISIGO B.A., 1998 : Rainfall and runoff variability in the southwestern river system of Ghana. *Proceedings of the Abidjan'98 conference on the Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS Publ. n° 252, pp 307-321.
- OUARDA TAHA B.M.J., RASMUSSEN P.F., CANTIN J.F., BOBEE B., LAURENCE R., HOANG V.D. et BARABE G., 1999 : Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province du Québec. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2), pp 425-448.
- PATUREL J.E., Servat E., KOUAME B., BOYER J.F., LUBES H., et MASSON J.M., 1995 : Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, 6(1), pp 95-102.
- PATUREL J.E., SERVAT E., KOUAMÉ B., LUBÈS H., OUEDRAOGO M. et MASSON J.M., 1997 : Climatic variability in humid Africa along the gulf of Guinea. Part II : an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191, pp 16-36.
- SERVAT E., PATUREL J.E., LUBÈS H., KOUAMÉ B., OUEDRAOGO M. et MASSON J.M., 1997 : Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I : detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 191, pp 1-15.
- SERVAT E., PATUREL J.E., LUBES-NIEL H., KOUAME B., MASSON J.M., TRAVAGLIO M., et MARIEU B., 1999 : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2), pp 363-387.
- SIRCOULON J., 1976 : Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale - Comparaison avec les sécheresses de « 1913 » et « 1940 ». *Série Hydrologie - Cahiers ORSTOM*, 13(2), pp 75-174.
- SIRCOULON J., 1987: Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle. *Proceedings of the Vancouver Symposium on the Influence of Climatic Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources*. IAHS Publ. n° 168, pp 13-25.
- TARHULE AONDOVER & WOO MING-KO, 1998 : Changes in Rainfall characteristics in Northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, 18(11), pp 1261-1271.
- VANDIEPENBEECK M., 1998 : El Niño : l'enfant terrible du pacifique. *Ciel et Terre*, 114(2), pp 52-56.
- WMO, 1966 : Climatic change. Report of a working group of the commission for climatology - Technical Note N° 79. Secretariat of World Meteorological Organization - Geneva - Switzerland, 79p.

# ETUDE SPATIALE DE L'ALEA PLUVIEUX EN REGION MEDITERRANEENNE. APPLICATION A L'EPISODE PLUVIEUX DES 12 ET 13 NOVEMBRE 1999 DANS L'AUDE (FRANCE)

Neppel L., Desbordes M.

Université Montpellier 2 - Maison des Sciences de l'Eau - UMR 5569 Hydrosociétés – UMII / CNRS / IRD – cc MSE - 34095 MONTPELLIER Cedex 5

[neppel@msem.univ-montp2.fr](mailto:neppel@msem.univ-montp2.fr) et [desbo@msem.univ-montp2.fr](mailto:desbo@msem.univ-montp2.fr)

## RESUME

Cette communication présente une analyse de l'aléa pluvieux sur la région Languedoc-Roussillon (Sud de la France). On s'est imposé d'exploiter les informations pluviométriques les plus denses sur la zone d'étude et sur une période d'observation de 1958 à 1993. Le réseau de pluviomètres de la banque Pluvio de Météo-France a été utilisé. Le choix d'un seuil de tri de 190 mm/48h maximum a permis de sélectionner 93 épisodes pluvieux sur lesquels reposent cette analyse.

Plutôt que de caractériser l'aléa par une fréquence associée à une hauteur de pluie mesurée ponctuellement pendant une durée fixée, on a choisi de tenir compte de l'extension spatiale des précipitations en déterminant les distributions régionales des aires d'isohyètes, définies à un seuil de pluviométrie quelconque compris entre 50 et 300 mm en 48h maximum. Conjointement, la distribution régionale de l'occurrence de pluie a été estimée. L'occurrence est définie en un poste à un seuil pluviométrique  $\tau$ , comme le nombre de fois où ce poste a enregistré plus de  $\tau$  mm / 48h maximum durant la période d'observation.

Appliquées aux précipitations diluviennes observées dans l'Aude le 12 et 13 novembre 1999, ces résultats montrent que les caractéristiques de cet épisode pluvieux sont d'abord son extension spatiale, mais surtout sa localisation dans l'espace régional. De plus un tel événement a une fréquence bien plus courante lorsqu'on l'estime à l'aide de cette approche spatiale que lorsqu'on utilise uniquement les séries pluviométriques ponctuelles. Ce point est d'ailleurs en accord avec une analyse historique des crues de l'Aude et de fleuves côtiers avoisinants. Ces différences s'expliquent par les distances interpostes du réseau de pluviomètres, trop grande au regard de certains épisodes ou surfaces pluvieuses localisées : les analyses ponctuelles de l'aléa y sont plus sensibles que l'analyse spatiale que l'on a proposée.

## INTRODUCTION

Le 13 novembre 1999 le pluviographe de Lézignan les Corbières (Aude) totalisait 620 mm de pluie en 48 heures fixes dont 551.2 mm mesurés durant 24h entre 6h TU le 12 novembre et 6h TU le 13 novembre. La zone touchée par les fortes pluies s'étend des Pyrénées-Orientales jusqu'au Sud du Tarn et au Nord-Ouest de l'Hérault. Les écoulements torrentiels ont causé la mort de 35 personnes et l'on estime les dégâts matériels à 3.5 milliards de francs. Comme après chaque catastrophe hydrologique (Nîmes en octobre 1988, Vaison la Romaine en septembre 1992, Puicerguier dans l'Hérault et Biescas en Espagne en 1996) on s'interroge sur la fréquence de telles précipitations et sur la caractérisation de l'aléa pluvieux, en particulier dans les régions méditerranéennes.

Classiquement cet aléa climatique est étudié au travers des fréquences d'un cumul de pluie  $H(\delta t)$  sur une durée  $\delta t$  fixée, observé localement en un poste de mesure donné. Souvent cet aléa est quantifié par la période de retour, notée  $T$  (en années), qui représente la durée moyenne entre deux observations successives d'un cumul de pluie  $H(\delta t)$  supérieur à une valeur fixée  $h_T(\delta t)$ . Cependant cette approche souffre de plusieurs limites, en particulier liées au climat des régions méditerranéennes [3], [4]. En effet la variabilité spatiale des précipitations est telle que les estimations des périodes de retour n'ont qu'une validité locale. De plus ces estimations reposant sur une étude statistique, elles sont aussi très sensibles à l'échantillon analysé c'est à dire à la période d'observation : celle-ci ce doit d'être la plus longue possible.

Par ailleurs, on a montré que la densité de postes pluviométriques biaisait également ces estimations ponctuelles de l'aléa et pouvait conduire à une sous-estimation des périodes de retour régionales [10]. Une approche plus récente reposant sur un générateur stochastique d'événements pluvieux semble plus robuste face aux problèmes d'échantillonnage [1]. Cependant, ce modèle génère des chroniques ponctuelles de pluies : les estimations de l'aléa n'ont qu'une validité locale, il subsiste le problème d'abattement des quantiles ponctuels. L'objet de cette note est de présenter une approche spatiale pour caractériser l'aléa

pluvieux sur la région Languedoc-Roussillon et son application à l'analyse fréquentielle de l'épisode pluvieux des 12 au 13 novembre 1999.

## OBJECTIFS ET DEMARCHE.

Cette approche repose sur une période d'observation longue de 36 ans, entre 1958 et 1993. Pour limiter les fluctuations d'échantillonnage, on s'est imposé d'exploiter l'information la plus dense disponible sur cette période en utilisant le réseau de pluviomètres de Météo-France. Sur cette période le nombre de postes en service varie de 9.1 à 12.6 postes pour 1000 km<sup>2</sup>. Les précipitations sont étudiées sur une durée minimum de 24h avec deux objectifs :

- déterminer l'aire couverte par les isohyètes de pluie définies à des seuils de pluviométrie  $\tau$  variables, l'aléa étant ensuite caractérisé par la distribution régionale de ces aires pour chaque seuil  $\tau$  ;
- analyser la distribution spatiale de l'occurrence de pluie dans l'espace régional, l'occurrence de pluie étant définie, en un point, par rapport à un seuil de pluie  $\tau$ , comme le nombre de fois que ce point est touché par plus de  $\tau$  mm entre 1958 et 1993.

L'étude repose sur un échantillon d'épisodes pluvieux extraits de la banque de données PLUVIO de Météo-France. Le critère de sélection est l'observation d'au moins 190 mm/24h sur au moins un poste de la région. Lorsque ce critère a été observé à une date  $k$  donnée, toutes les mesures pluviométriques disponibles sur la région et les départements voisins à cette date ont été extraites de la banque PLUVIO. Compte tenu des contraintes de mesures des pluies journalières et pour éviter de ne pas sélectionner un épisode répondant à ce critère mais se produisant durant 2 jours consécutifs, le critère a été étendu à 190 mm/48h. 93 épisodes pluvieux ont été sélectionnés [6]. Compte tenu des contraintes d'échantillonnage, la durée des épisodes est inconnue, elle est bornée par 48 h. Dans la suite, lorsque l'on mentionne une hauteur de pluie, il est implicitement entendu qu'il s'agit d'une hauteur de pluie mesurée pendant une durée maximum de 48 h.

## DISTRIBUTIONS REGIONALES DES AIRES DES ISOHYETES DE PLUIE

A partir d'un krigeage climatologique on a pu estimer, pour chaque épisode  $k$ , l'aire  $S_{\tau,k}$  couverte par les isohyètes de pluie sur la région Languedoc-Roussillon. Le seuil  $\tau$  varie entre 50 et 300 mm, par intervalle de 10 mm. Pour chaque seuil, la distribution des aires  $S_{\tau}$  est étudiée. On a observé qu'une loi Gamma incomplète à deux paramètres représentait la distribution des aires d'isohyètes  $S_{\tau}$ , quel que soit  $\tau$ . Une relation entre  $\tau$  et les deux paramètres de la loi Gamma incomplète a été déterminée et permet d'estimer la distribution des aires des isohyètes définies à n'importe quel seuil  $\tau$  compris entre 50 et 300 mm [8], [9]. L'éq1 permet ainsi de déterminer la probabilité de dépassement d'une isohyète d'aire  $S_{\tau}$  :

$$\text{Prob}[S_{\tau} > s] = 1 - F(s) = 1 - \int_0^s \frac{1}{|\beta(\tau)|^{\alpha(\tau)} \Gamma(\alpha(\tau))} x^{\alpha(\tau)-1} e^{\frac{-x}{\beta(\tau)}} dx \quad \text{eq. 1}$$

où  $\alpha(\tau)$  et  $\beta(\tau)$  sont les deux paramètres de la loi.

On en déduit la période de retour  $T$  d'isohyète  $S_{\tau}$  d'aire au moins égale à  $s$  :

$$T = \frac{1}{\lambda \cdot \text{prob}[S_{\tau} > s]} \quad \text{eq. 2}$$

où  $\lambda$  est le nombre moyen annuel d'épisodes dépassant  $\tau$  mm de pluie observée sur la région .

La figure 1 présente la cartographie de l'épisode du 12 et 13 novembre 1999. Elle est obtenue à l'aide de 207 postes pluviométriques localisés sur les départements les plus touchés de l'Aude, du Tarn, des Pyrénées-Orientales et de l'Hérault, soit une densité de 9.4 postes/1000 km<sup>2</sup>. On utilise en plus 130 postes sur les départements limitrophes pour limiter les effets de bords lors de l'interpolation spatiale. On observe que les précipitations de plus de 200 mm en 48 h sont très étendues : l'isohyète 200 mm représente 35% de la superficie des départements de l'Aude, des Pyrénées-Orientales et de l'Hérault, l'isohyète 400 mm couvre 13% de la superficie du département de l'Aude seul. Des isohyètes 200 mm d'étendue comparable ont été

observées entre 1958 et 1993, mais durant des épisodes généralisés qui affectaient toute la région Languedoc-Roussillon (par exemple les 06 et 07 novembre 1982), ces isohyètes ne formant alors pas un seul domaine mais plusieurs zones non connexes. Dans notre cas par contre, les isohyètes sont concentrées sur une même zone géographique. Une isohyète 400 mm aussi étendue n'a pas été observée durant la période 1958-1993, en Languedoc-Roussillon.

Une première analyse fréquentielle des mesures ponctuelles, en exploitant les 93 épisodes sélectionnés entre 1958 et 1993, montre que des cumuls ponctuels de plus de 600 mm en un maximum de 48h ne sont pas « rares » : à l'échelle régionale. On a observé de tels cumuls durant trois épisodes entre 1958 et 1993 : leur période de retour empirique régionale est de l'ordre de 12 ans.

La seconde analyse consiste à exploiter les résultats de l'étude spatiale et régionale de l'aléa. L'équation (2) permet d'estimer la période de retour d'une isohyète définie au seuil de pluviométrie  $\tau$  d'aire  $S_\tau$  au moins égale à une valeur fixée notée  $s$ . Pour  $\tau = 100$  mm, 200 mm et 300 mm,  $s$  prend successivement les aires des isohyètes  $S_\tau$  observées du 12 au 13 novembre 1999 (Fig. 1).

TABEAU 2 : Période de retour régionale des aires des isohyètes observées les 12 et 13 novembre 1999.  $+IC_{90\%}$  et  $-IC_{90\%}$  représentent respectivement la borne supérieure et inférieure de l'intervalle à 90% de cette estimation

	$\tau=100$ mm	$\tau=200$ mm	$\tau=300$ mm
$+IC_{90\%}$	15 ans	32 ans	300 ans
$T[S_\tau > s]$ (ans)	9 ans	18 ans	134 ans
$-IC_{90\%}$	6 ans	10 ans	60 ans

L'analyse des résultats (TABEAU 2) montre que dans l'espace régional, l'étendue des isohyètes jusqu'à 200 mm n'est pas rare : la durée moyenne séparant deux isohyètes 200 mm au moins aussi étendues que celle du 12 au 13 novembre est de l'ordre de 20 ans. Ce n'est qu'à partir de  $\tau \geq 300$  mm que la période de retour régionale des isohyètes observées dépasse 100 ans.

On notera que pour cet épisode les isohyètes définies pour  $\tau > 200$  mm affectent une même zone géographique, alors que pour les épisodes analysés entre 1958 et 1993 elles touchent en général plusieurs zones distinctes : les contreforts Cévenoles, les Pyrénées-Orientales et les Monts de l'Espinouse.

On remarquera qu'il s'agit pour l'instant des fréquences de l'épisode à l'échelle de la région Languedoc-Roussillon. L'analyse de l'occurrence de pluie qui va suivre montre que l'occurrence de ces fortes pluies n'est pas uniforme sur la région. On va ainsi pouvoir préciser la fréquence de l'épisode en limitant la fenêtre géographique d'observation à la zone touchée en novembre 1999.

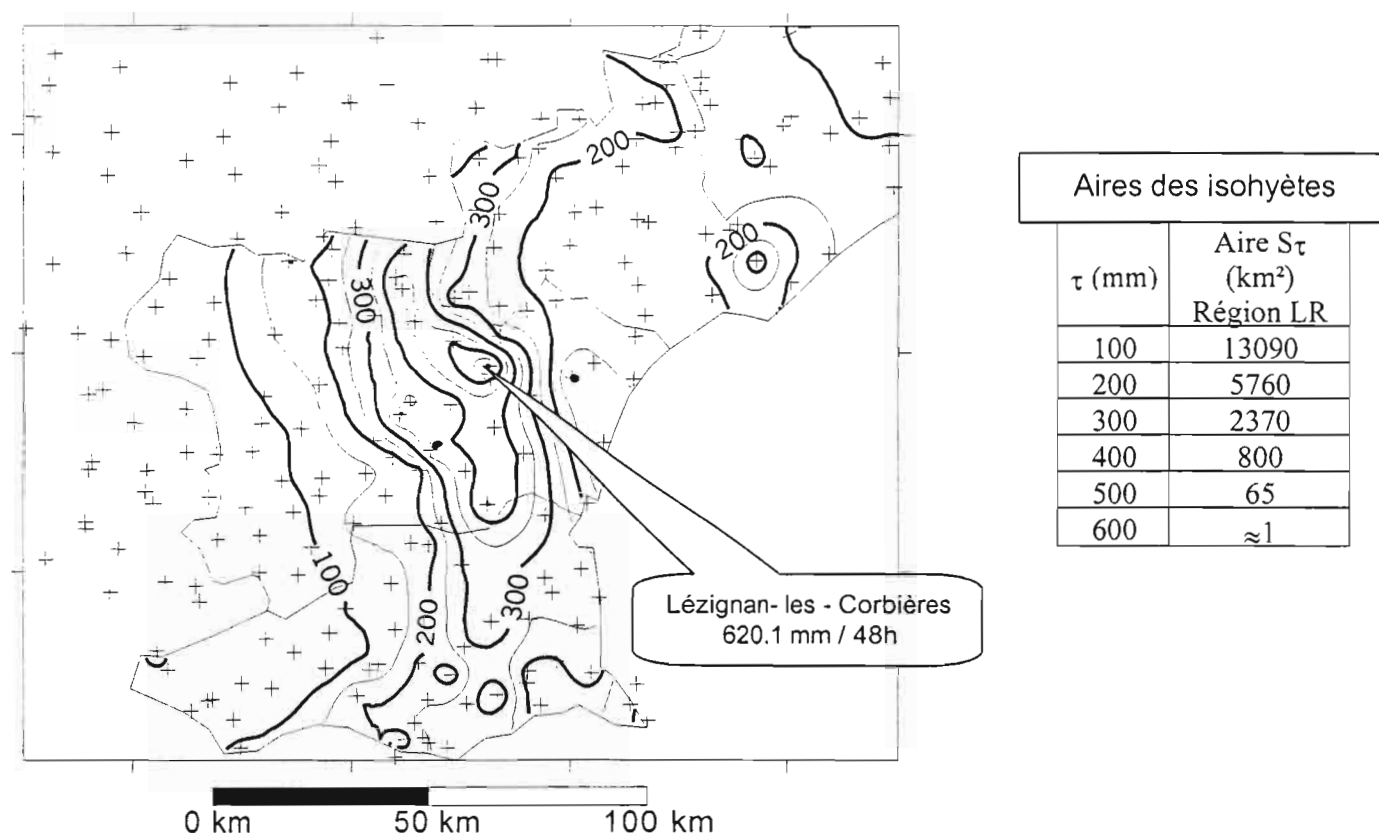


Fig. 1 cartographie des précipitations (mm) du 12 novembre 1999 à 6 hTU au 14 novembre 1999 à 6 hTU et aire des isohyètes correspondantes.

## DISTRIBUTION DE L'OCCURRENCE DE PLUIE SUR LA REGION ET FREQUENCES DE L'EPISODE DE NOVEMBRE 1999 A L'ECHELLE DU DEPARTEMENT DE L'AUDE

On définit l'occurrence de pluie en un point par rapport à un seuil de pluie  $\tau$ , comme le nombre de fois que ce point est touché par plus  $\tau$  mm de pluie entre 1958 et 1993. A chaque poste pluviométrique en fonctionnement sur la région on a calculé l'occurrence pour  $\tau=100, 200$  et  $300$  mm. La distribution spatiale de l'occurrence est caractérisée par sa densité de probabilité dans l'espace régional, notée  $f_{U\tau}$ . Celle-ci est estimée par une méthode non paramétrique des fonctions à noyaux [11] qui s'affranchit d'une hypothèse à priori sur la forme de la densité de probabilité. La figure 1 présente la densité de l'occurrence pour  $\tau = 200$  mm. Elle caractérise la localisation des pluies extrêmes dans l'espace régional. L'occurrence des pluies extrêmes n'est pas uniforme sur la région l'influence des massifs montagneux des Cévennes (premier mode), des monts de l'Espinouse (mode secondaire) et des Pyrénées-Orientales (troisième mode) apparaît clairement. Outre cet aspect descriptif, la densité de l'occurrence permet de tenir compte de l'instationnarité des pluies extrêmes de la région dans l'analyse de l'aléa. Si l'on s'intéresse à une zone géographique  $D$  fixée et d'aire  $s$ , sachant qu'un épisode générant plus de  $\tau$  mm de pluie sur une superficie  $S_\tau = s$  touche la région LR, on peut estimer par l'équation 3, la probabilité que cet épisode se produise en  $D$  (Fig. 2):

$$\text{Prob}[S_\tau / D] = \iint_{(x,y) \in D} f_{U\tau}(x, y) dx dy \quad \text{eq. 3}$$

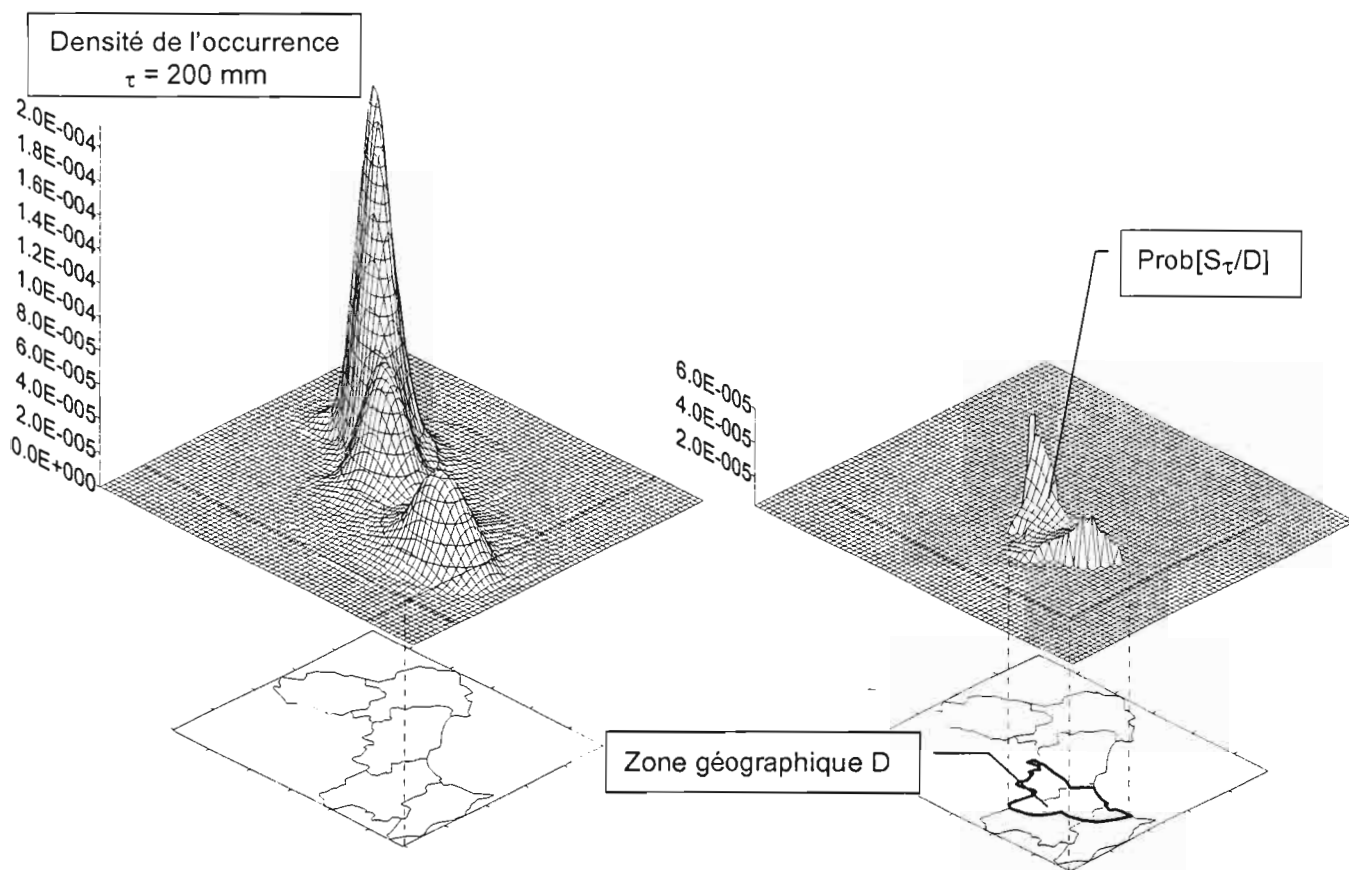


Fig. 2 : Densité de l'occurrence au seuil  $\tau = 200$  mm sur la région Languedoc-Roussillon et illustration du calcul des fréquences de l'événement à l'échelle du département de l'Aude.

La prise en compte de la distribution de l'occurrence permet d'estimer des fréquences d'événements sur une zone géographique D de la région Languedoc-Roussillon, comme l'illustre cette application à l'épisode de novembre 1999 dans l'Aude. Pour un seuil  $\tau$  fixé, la probabilité qu'une isohyète  $S_\tau$  d'aire au moins égale à  $s$  se produise sur la zone touchée les 12 et 13 novembre peut être approchée à l'aide de :

- la probabilité régionale d'observer une isohyète  $S_\tau$  d'au moins  $s$  km<sup>2</sup> :  $\lambda \cdot \text{prob}[S_\tau > s]$  (Cf. eq. 2) ;
- la probabilité qu'une telle isohyète se produise sur le domaine D, en tenant compte de la localisation dans l'espace régional des pluies extrêmes :  $\text{prob}[s/D]$  (Cf. eq. 3) ;

La période de retour dite 'locale' s'en déduit :

$$T = \frac{1}{\lambda \cdot \text{prob}[S_\tau > s] \cdot \text{prob}[s/D]} \quad \text{eq. 4}$$

où D est la zone géographique affectée par l'isohyète  $S_\tau$  (Fig. 2)

A partir du tableau 2, on observe qu'exceptée pour l'isohyète 300 mm, les périodes de retour locales des isohyètes sont plus courantes que celles obtenues par une analyse des chroniques ponctuelles de pluie. A titre d'exemple on donne l'intensité horaire maximale de 106 mm/h dont la période de retour estimée sur le poste de mesure est supérieure à 1000 an, ce qui n'a pas grande signification compte tenu de la faible longueur des chroniques analysées.

Par rapport aux périodes de retour régionales des isohyètes, ces périodes de retour locales sont plus grandes, l'écart augmentant avec le seuil de pluie  $\tau$ .



TABLEAU 3 : période de retour des aires des isohyètes observées en novembre 1999, à l'échelle du département de l'Aude.

	100 mm	200 mm	300 mm
T (ans)	20 ans	150 ans	>1000 ans

## DISCUSSION.

A l'échelle d'espace d'une région comme le Languedoc-Roussillon, l'analyse de la fréquence de l'épisode pluvieux du 12 au 13 novembre 1999 montre que de telles précipitations ne sont pas rares, que l'on considère les cumuls ponctuels maxima mesurés en 48 h ou l'étendue des isohyètes définies à des seuils inférieurs à 200 mm/ 48 h. Ce n'est que pour les isohyètes définies à des seuils supérieurs à 200 mm/ 48 h que cet épisode apparaît comme plus rare à l'échelle régionale. Cependant, exceptée l'étendue des plus forts cumuls, c'est surtout la localisation des pluies dans l'espace régional qui caractérise le plus ce phénomène, comme le montre l'écart entre les périodes de retour régionales et locales des isohyètes.

Par ailleurs l'analyse fréquentielle à partir des chroniques ponctuelles de mesures pluviométriques tend à sous-estimer les fréquences de l'épisode pluvieux par rapport à l'approche spatiale présentée. L'analyse historique des crues extrêmes dans les Pyrénées-Orientales et l'Aude tend à valider les résultats de l'approche spatiale [5], [12] : durant l'épisode pluvieux baptisé « l'aiguat de 1940 », par exemple, des cumuls journaliers encore plus importants, au moins 840 mm/j le 17 octobre 1940. A partir des cartes pluviométriques [6], [12], les superficies des isohyètes de plus de 200 mm ont été estimées, et elles sont plus étendues que celles observées en novembre 1999. Cette différence entre l'étude ponctuelle et spatiale de l'aléa s'explique par les distances interpostes du réseau de pluviomètres, trop grandes comparées à la dimension des cellules pluvieuses les plus intenses. De ce fait, on a pu montrer [10] :

- qu'une partie des cellules pluvieuses qui affectent la région ne sont pas interceptées par le réseau ;
- que l'analyse fréquentielle des cumuls ponctuels de pluie est plus sensible à ce biais que l'approche spatiale décrite.

## BIBLIOGRAPHIE.

- ARNAUD P., LAVABRE J., 2000. Nouvelle approche de la prédétermination des pluies extrêmes. C.R. Acad. Sci. Paris, à paraître.
- BRUNSDON C., 1995. Estimating probability surfaces for geographical point data : an adaptative kernel algorithm. *Computer and Geosciences*, (21), 7 : 877-894.
- DESBORDES M., 1994. Principales causes d'aggravation du risque d'inondation par ruissellement pluvial en milieu urbanisé. *Congrès de SHF, Nîmes*, tome 2 : 487-492.
- DESBORDES M., DUREPAIRE P., GILLY J.C., MASSON J.M., MAURIN Y., 1989. 3 octobre 1988, inondations sur Nîmes et sa région : Manifestation, Causes et Conséquences. Ed. Hydropol, 95p.
- ENGREF, 2000. Analyse de l'épisode pluvieux du 12 et 13 novembre 1999. Document pédagogique interne, ENGREF Montpellier.
- JACQ V., 1995. Inventaire des situations à précipitations diluviennes en Languedoc-Roussillon / Paca / Corse. Service Central d'Exploitation de la Météorologie, Direction Interrégionale Sud-Est, 190p.
- LANG M., RASMUSSEN P., OBERLIN G., Bobee B., 1997. Echantillonnage par valeurs supérieures à un seuil : modélisation des occurrences par la méthode du renouvellement. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 3, 279-320.
- NEPPEL L., 1997. Le risque pluvial en région Languedoc-Roussillon : caractérisation de l'aléa climatique. Thèse de doctorat de l'université Montpellier II, 272 p.
- NEPPEL L., DESBORDES M., MASSON J.M., 1998 : Caractérisation spatiale de l'aléa climatique en région méditerranéenne : analyse statistique des surfaces pluvieuses. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 2, 155-174.
- NEPPEL L., DESBORDES M., MASSON J.M., 1998 : Influence de l'évolution dans l'espace et le temps d'un réseau de pluviomètres sur l'observation des surfaces de pluie en fonction de leur aire. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 1, 43-60
- SILVERMANN W., 1986. Density estimation for statistics and data analysis. Ed Chapman & Hall, London, 175p.
- SOUTADE G., 1993. Les inondations d'octobre 1940 dans les P-O. Conseil général, Direction des archives départementales de Perpignan, 351 p.

# PREDETERMINATION REGIONALE DES DEBITS DE CRUE. EXEMPLE D'APPLICATION A LA CORSE

Lavabre J.\*, Folton N.\*, Arnaud P.\*\* , Pasquier C.\*\*\*

\* Cemagref Aix-en-Provence

\*\* MSE, UMR Hydrosciences, Université Montpellier II

\*\*\* DIREN Corse

La note présente la méthodologie utilisée et les résultats obtenus dans le cadre d'une étude régionale des débits des cours d'eau de la Corse. La méthodologie est basée sur la méthode SHYPRE régionalisée. Cette méthode associe un générateur stochastique de pluies horaires et une modélisation de la pluie en débit. La méthode aboutit à différentes cartographies des débits de pointe de crue et des débits moyens de différentes durées dans une gamme large de fréquence (période de retour de 2 à 100 ans). L'information pixelisée au km<sup>2</sup> est ensuite agglomérée à l'échelle du bassin versant, et permet ainsi de proposer des estimations de débits de crue en tout point du réseau hydrographique de la Corse. L'ensemble de cette information fait l'objet d'un système d'information géographique géré sous ArcView ce qui assure une excellente convivialité et un bon confort d'utilisation.

Mots-clés : crue, modélisation, SIG

## INTRODUCTION

La connaissance des débits de crue est nécessaire pour la conception des aménagements des cours d'eau, le dimensionnement des ouvrages de franchissement, la protection des zones urbaines... Rappelons que les Plans de Prévention des Risques Inondation (PPRI), introduits par la loi sur l'eau de 1992, fixent comme objectif de protection le débit de crue centennal (ou la plus grosse crue connue si elle excède le débit centennal). La définition du débit centennal est statistique : c'est le débit qui a une probabilité d'apparition annuelle de 1 %. Les objectifs de protection varient selon les aménagements et les risques encourus : ordre de grandeur quinquennal ou décennal pour les aménagements de cours d'eau en milieu naturel, probabilité d'apparition faible à très faible ( $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ) pour les ouvrages tels que les barrages ... Au-delà de ces seuls débits maxima, la connaissance des débits moyens sur différents pas de temps et des formes d'hydrogrammes sont nécessaires pour les calculs des ouvrages de rétention et la simulation hydraulique des champs d'inondation.

Des études hydrologiques spécifiques sont nécessaires pour la détermination des débits de référence de crue. Grâce à un traitement exhaustif de l'information disponible sur le bassin versant, à l'expertise de l'hydrologue...ces études peuvent mettre en évidence les spécificités du bassin versant et par-là même réduire les incertitudes de calcul. Toutefois, les études de synthèse ont aussi un intérêt certain : elles permettent une estimation rapide des débits de crue, sur la base d'une compilation de l'ensemble des informations disponibles sur une zone géographique étendue. Ces estimations sont d'ailleurs souvent utilisées et affinées dans les études spécifiques.

Les formulations de synthèse utilisées actuellement en France, datent d'une vingtaine d'années : méthode développée par SOGREAH (1967) pour la connaissance du débit de crue de fréquences décennale et centennale, méthode CRUPEDIX (1980) développée par le Cemagref pour la connaissance du débit de crue décennal, méthode SOCOSE (1980) qui propose en plus une forme d'hydrogramme de fréquence décennale.

La disponibilité d'une vingtaine d'années supplémentaires d'observation, la nécessité d'avoir une estimation dans une gamme de fréquence plus large (période de retour entre 2 et 1000 ans), la nécessité d'avoir, en plus des seuls débits de pointe, une évaluation des débits moyens sur des durées plus importantes (jusqu'à 72 heures) ont conduit la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) de la région Corse à initier une étude de synthèse. Cette synthèse a été confiée au Cemagref, groupement d'Aix-en-Provence. La présente note rapporte les principaux résultats auxquels la synthèse a abouti.

## METHODES D'USAGE COURANT POUR LA CONNAISSANCE REGIONALE DES DEBITS DE CRUE

Les méthodes sommaires d'estimation des débits de référence de crues peuvent se classer en deux grandes familles :

- les méthodes rationnelles, dans lesquelles le débit est exprimé en fonction de la surface du bassin versant, de la pluie sur une durée caractéristique à définir et d'un coefficient d'écoulement qui représente la fraction de pluie qui s'écoule à l'exutoire du bassin versant. Il existe de nombreuses expressions de ce type de formulation faisant apparaître des variables physiques pour le calcul du temps caractéristique et/ou d'occupation de l'espace pour l'estimation du coefficient d'écoulement.

Ces méthodes sont généralement appliquées sur des petits bassins versants (taille inférieure à 10 km<sup>2</sup>). Ces formulations ne sont pratiquement jamais validées par des observations et font plutôt appel à l'expertise des techniciens qui les utilisent.

- les méthodes issues d'approches statistiques. Ces méthodes ont au moins une base de départ commune : l'information débit des réseaux de mesure. Malgré quelques différences dans les approches, les statistiques effectuées sur ces chroniques conduisent généralement à des valeurs comparables des débits dans la gamme des fréquences courantes (période de retour entre 2 et 20 ans). Par contre, des divergences marquées sont quelquefois observées sur les estimations du débit de fréquence rare en fonction des méthodologies d'estimation mises en œuvre. Des formulations régionales sont construites sur la base des informations statistiques locales. Les supports de régionalisation sont généralement:

- \* *La surface du bassin versant* : bien que les débits de pointe de crue puissent diminuer de l'amont vers l'aval pour certains bassins versants qui présentent des champs d'inondation importants, la relation en moyenne avec la surface est croissante, avec un exposant de la surface compris entre 0,7 et 0,8 .
- \* *La pluviométrie* : généralement une estimation du quantile décennal de la pluie journalière ;
- \* *Diverses variables* : coefficient régional, indice de pente du bassin versant, indicateur de perméabilité qui permettent de prendre en compte les spécificités hydrologiques des bassins versants.

Que ce soit l'une ou l'autre des approches, il est à remarquer que régionalisation est synonyme de rusticité. Les approches sont limitées à des calculs très sommaires, ce qui n'est pas forcément stupide. Mais on peut penser qu'avec l'évolution des moyens de calcul et une plus grande disponibilité d'information spatiale on puisse, sinon faire mieux, tout au moins proposer des approches nouvelles associées à des modes de représentation valorisant les avancées technologiques actuelles. Mais restons très clair : toute approche de détermination des débits est avant tout une démarche hydrologique qui doit être impérativement confrontée à l'information des réseaux de mesure, malgré les incertitudes qui les entachent et qui sont inhérentes à toute mesure physique.

## LA METHODE SHYPRE

### Présentation

SHYPRE, acronyme de Simulation d'HYDrogramme pour la PREdétermination des crues, est une méthode développée au Cemagref à Aix-en-Provence. SHYPRE associe un générateur stochastique de pluies horaires à une modélisation de la pluie en débit. Les techniques de simulation permettent de générer de très longues chroniques de pluie horaire (sur 100 000 ans, par exemple), d'où se déduisent les hydrogrammes de crue par application d'une modélisation simple de la pluie en débit. Un simple classement des pluies et des débits simulés permet de tracer les distributions de fréquence « empiriques » des pluies et des débits de toutes durées et d'en déduire les quantiles pour l'ensemble de la gamme des fréquences.

## Le modèle stochastique de simulation de pluie

Le modèle de génération de pluie appartient à la famille des modèles stochastiques dits à approche directe, basés sur une description géométrique du signal temporel de pluie. Inspiré des travaux de Tourasse (1981) puis Lebel (1984), le modèle utilisé ici a été développé au Cemagref par Cernesson (1993, 1996) et Arnaud (1997, 1998). La génération du signal temporel de pluie est réalisée en deux étapes :

La première étape est l'étude descriptive du phénomène. Elle est basée sur l'analyse de la structure temporelle interne des événements pluvieux observés au pas de temps horaire. Elle amène au choix des lois de probabilité qui les caractérisent. La seconde étape est la reconstitution de la chronique de pluie par les variables descriptives, générées de façon aléatoire par une méthode de Monte Carlo.

L'étude d'une cinquantaine de postes pluviographiques, situés sur le pourtour méditerranéen français, a permis de déterminer les lois de probabilité théoriques qui reproduisent au mieux les distributions de fréquences empiriques des différentes variables.

## La transformation de la pluie en débit

Il est clair que toute sorte de modélisation de la transformation de la pluie en débit peut être utilisée. Remarquons toutefois que le générateur de pluie qui s'appuie sur l'information ponctuelle d'un poste de mesure donné, ne reproduit au mieux qu'une information ponctuelle. Ce qui exclut a priori l'utilisation de modèles spatialisés prenant implicitement en compte l'information pluie dans l'espace.

Dans son développement actuel, SHYPRE utilise deux modèles :

- le modèle conceptuel GR3H (Edijatno 1989, Michel 1989, 1998) défini par 3 paramètres ;
- la fonction de production SCS (Soil Conservation Service, USDA, 1985) associée à un hydrogramme unitaire. Ce modèle est défini par 2 paramètres : un pour la fonction de production et le temps de montée de l'hydrogramme unitaire.

C'est ce dernier modèle qui sera ici utilisé.

## La méthode SHYPRE régionalisée

La régionalisation de la méthode concerne le modèle de génération des hyétogrammes horaires et le modèle de transformation des hyétogrammes en hydrogrammes.

### Régionalisation du générateur de hyétogrammes

Dans sa conception initiale, le modèle de génération de pluies comportait 9 variables. La définition de ces variables pour les deux saisons considérées par le modèle (hiver de décembre à mai, été de juin à novembre) nécessite le calage de 21 paramètres.

Différents tests de sensibilité ont permis de réduire la description du modèle à 5 variables (définies par 10 paramètres) sans altérer sensiblement les performances.

La première étape de régionalisation a été de rechercher des variables explicatives de la distribution dans l'espace des variables du modèle. La variable NE, nombre d'épisodes pluvieux moyen par saison (un épisode pluvieux présente au moins un total journalier supérieur à 20 mm), est considérée comme une variable directement cartographiable à partir de l'information journalière et ne fait pas l'objet de recherche de variables explicatives. Les travaux ont été orientés vers les pluies journalières dont la disponibilité, dans le temps et dans l'espace, est nettement plus grande que les chroniques de pluies horaires. Avec une seule caractéristique journalière, la moyenne des pluies journalières maximales PJMAX de chaque épisode pluvieux, le pourcentage d'explication des paramètres du modèle horaire sont dans la fourchette 50-90 % (à l'exception d'un paramètre pour lequel le pourcentage d'explication est faible et n'excède pas 25 %).

L'étape suivante a consisté à étudier la variabilité dans l'espace de NE et PJMAX pour les deux saisons considérées. Différents types de relation ont été essayés à partir de variables issues du Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 50 m. Des caractéristiques d'altitude (altitude moyenne modulée sur 500 x 500 m, altitude maximale et minimale sur une zone de 5 x 5 km autour du pluviomètre, distances à la cote orientale et à la cote occidentale...) ont un pouvoir d'explication maximal de 60 % pour PJMAX de la saison hiver et minimal de 45 % pour NE de la saison hiver.

La relative faiblesse de ces pouvoirs d'explication a nécessité la cartographie des résidus des différentes relations. Ces cartographies seront utilisées par la suite pour la reconstitution spatiale du modèle.

A cette étape, nous disposons d'une procédure de calcul spatial des paramètres de modèle de génération de hyétogrammes. Le modèle de génération des chroniques de pluie horaire peut être mis en œuvre en tout point de l'espace de la région Corse.

#### ***Définition spatiale d'un modèle pluie-débit.***

L'identification de l'opérateur pluie débit sur un bassin versant est une opération coûteuse. Coûteuse en information : des chroniques continues de débit à faible pas de temps et des chroniques de pluie d'un ou plusieurs postes pluviographiques. Coûteuse aussi en volume de travail : critique, constitution de couples averses-crues, identification de la modélisation ... L'opérateur, ainsi identifié par bassin versant, est un opérateur global (réponse du bassin versant) dont l'application à d'autres bassins versants n'est pas évidente a priori. Il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de bassins en espérant pouvoir résoudre a posteriori les effets d'échelles et identifier les spécificités des bassins.

Ce n'est pas la méthodologie retenue, faute d'information suffisante et sans garantie de réussite de ce lourd travail d'analyse.

Nous avons privilégié une approche ascendante qui consiste à paramétrer a priori le modèle et à contrôler ses performances sur les chroniques de débit disponibles.

Ainsi, la fonction de production du modèle est tabulée grâce à des indications géologiques et d'occupation de l'espace, et à notre ...expertise. L'identification d'une fonction de transfert facilement régionalisable dans une gamme de superficie de 1 km à 1 000 km<sup>2</sup> n'est pas non plus évidente. Ce qui nous a orienté vers une solution de facilité : travailler à l'échelle de pixels assez petits afin de négliger la fonction de transfert. En fait, nous avons retenu une fonction de transfert unique et invariante pour chacun des pixels de 1 x 1 km.

## **MISE EN ŒUVRE DANS UN SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE**

La méthodologie régionale précédemment développée est utilisée pour définir la pluviométrie et les débits. Le plus petit pas d'espace de définition est un pixel de 1 x 1 km, soit un peu plus de 8 000 pixels sur l'ensemble de la Corse.

### **L'information pluviométrique**

Elle se déduit, pour chaque saison de :

- une carte de PJMAX,
- une carte des NE,
- une carte des résidus de PJMAX,
- une carte de résidus des NE.

Les cartes de résidus ont été obtenues par lissage par une fonction SPLINE. Les cartes de PJMAX résultent du MNT et des relations évoquées en 3.2.

Ces informations cartographiques permettent de retenir une paramétrisation du modèle de génération pour chaque pixel. Parallèlement des simulations ont été effectuées pour différentes classes de paramétrisation. Cette base de données permet, pour chaque pixel, d'estimer par interpolation les quantiles de pluie de différentes durées (entre 1 et 72 heures) et de différentes périodes de retour (entre 2 et 100 ans).

### **L'information débit**

La fonction de production du modèle pluie débit est déduite de :

- une carte géologique simplifiée en 4 classes ayant une signification hydrologique avec un classement des terrains à très forte capacité de stockage jusqu'au terrains à capacité de stockage réduite ;
- une carte d'occupation de l'espace déduite de CORINE LAND COVER. L'information initiale a été aussi réduite à 4 classes : milieux artificiels, milieux agricoles, milieux naturels à végétation herbacée ou arbustive et milieux forestiers.

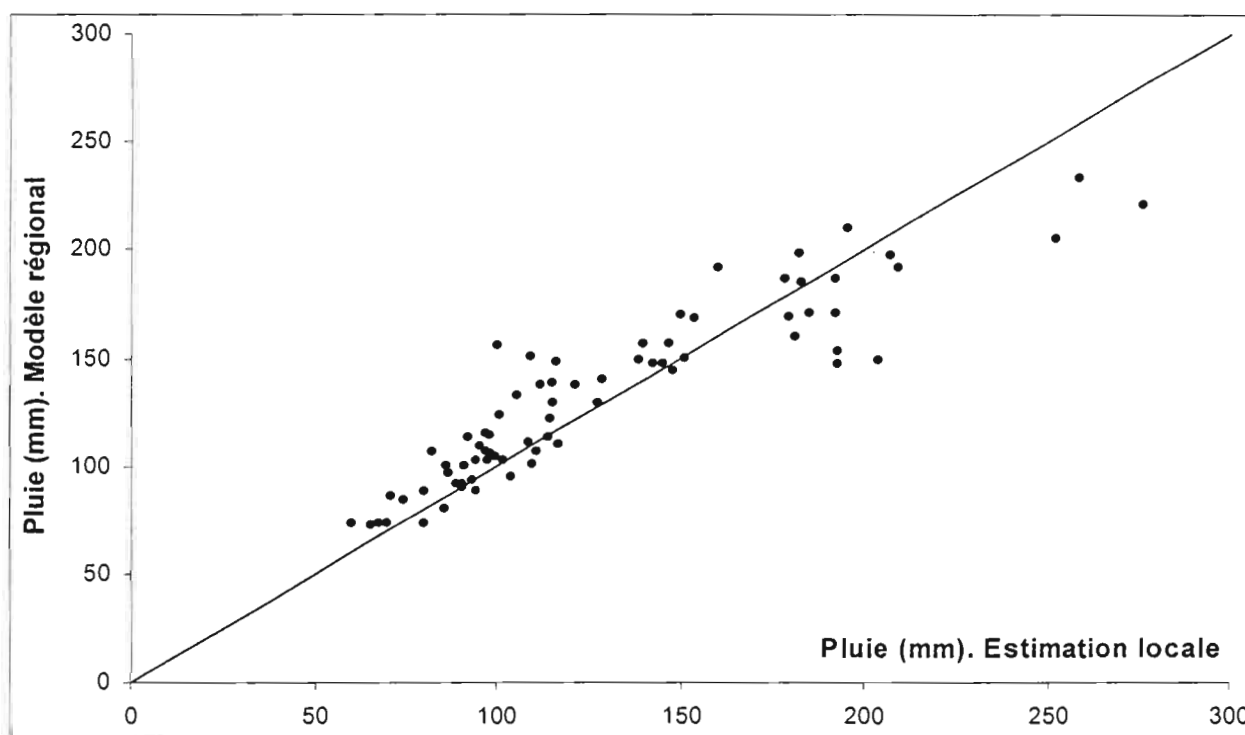
Ces deux couches d'information permettent d'établir une cartographie du paramètre de production du modèle.

Comme précédemment, des simulations pluies débits ont été effectuées pour plusieurs classes de pluie et plusieurs classes de paramètre de la fonction production. Cette base de données est utilisée pour extraire, pour un pixel donné, les débits de différentes durées (débit maximum et débits moyens de 1 h à 72 h) et de différentes périodes de retour (entre 2 et 100 ans).

### L'intégration de l'information à l'échelle du bassin versant

La méthode aboutit à une information pixélisée des débits : pour chacune des durées et chacune des fréquences, nous disposons d'une cartographie à un pas d'espace de 1 km<sup>2</sup>. Cette information pixélisée est agglomérée pour fournir, sur tout bassin versant, les débits de référence de crue. Les limites des bassins versants sont déterminées automatiquement à partir du MNT et de l'appliquet HYDROKIT développé par le bureau d'études STRATEGIS.

L'agglomération des pixels d'un quantile de débit donné pour estimer le même quantile de débit à l'exutoire du bassin versant n'est pas une pratique classique. Elle nous amène à proposer la notion de Fonction de Transfert Statistique (FTS). Des développements méthodologiques pour appréhender cette FTS sont nécessaires en relation du développement et de la hiérarchisation du réseau hydrographique et de la variabilité pluviométrique du bassin versant. Nous nous sommes limités ici à la définition d'un FTS globale, définie en fonction uniquement de la superficie du bassin versant. Elle s'écrit :



*Fig. 1 - Comparaison des performances du modèle régional sur les pluies journalières décennales*

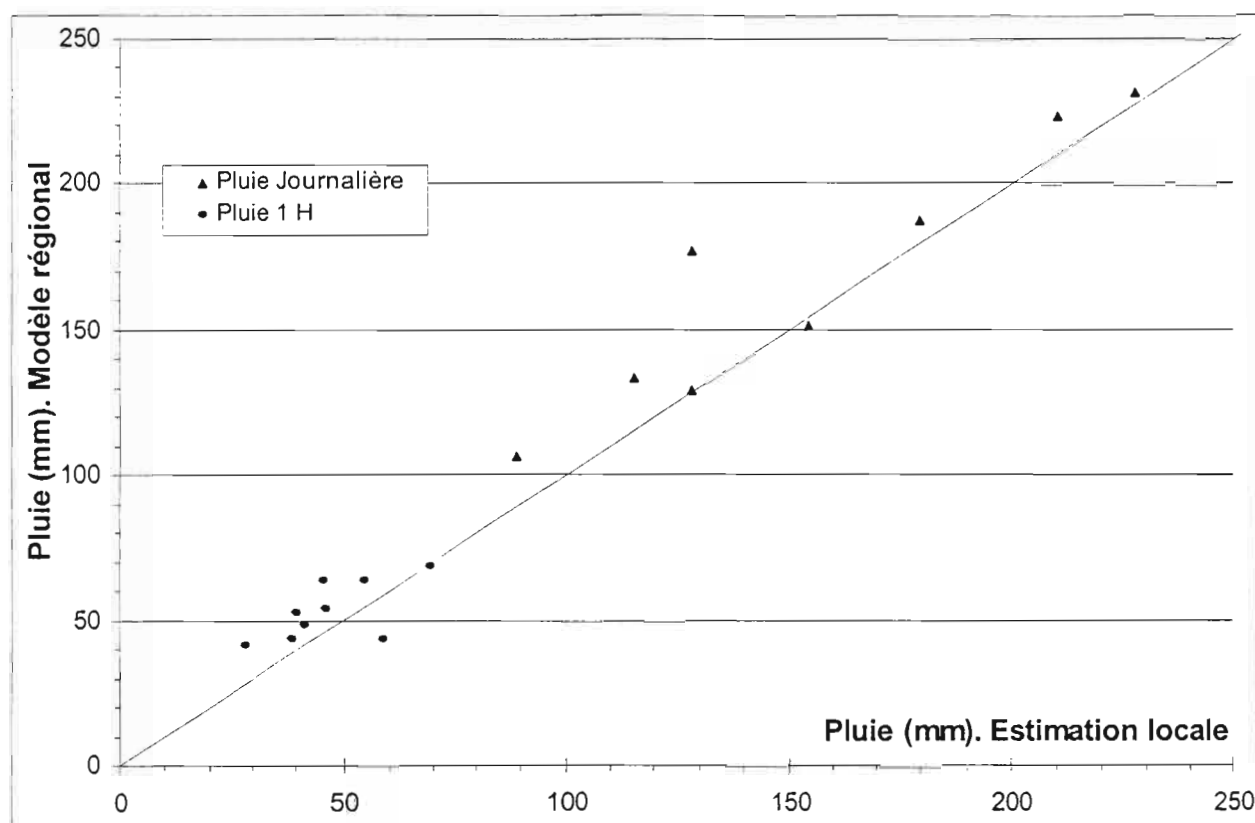


Fig. 2 - Comparaison des performances du modèle régional. Quantiles décennaux des pluies journalières et des pluies en 1 heure de 9 postes pluviographiques

$$Q(\text{dur}, T) = \left( \sum_{i=1}^n q(\text{dur}, T)_i \right) \times S^{-\alpha(1 - 1/\sqrt{S})}$$

où :

- $Q(\text{dur}, T)$  est le débit de durée  $\text{dur}$  et de période de retour  $T$  à l'exutoire du bassin versant,
- $q(\text{dur}, T)_i$  est le débit de durée  $\text{dur}$  et de période de retour  $T$  pour un pixel donné,
- $n$  représente le nombre de pixels du bassin versant,
- $S$  est la surface du bassin versant.
- $\alpha$  est une fonction décroissante de la durée  $\text{dur}$  ;  $\alpha = 0,2$  pour les débits de pointe et tend vers 0 pour les grandes durées ( $\alpha = 0,08$  pour  $\text{dur} = 72$  heures).

Les débits sont exprimés en  $\text{m}^3/\text{s}$  et la surface en  $\text{km}^2$ .

L'ensemble de ces informations est intégré dans un système d'information géographique écrit sous ARCVIEW. Ce système permet à l'utilisateur d'estimer en tout point du réseau hydrographique les débits de référence de crue par un simple clic en un point du réseau hydrographique.

## CONTROLE DES PERFORMANCES DE LA METHODE

### La pluviométrie

En cliquant sur un pixel, le SIG propose une estimation des courbes intensité-durée-fréquence de pluie de ce pixel. A titre d'exemple, les figures 1 et 2 comparent les valeurs déduites du modèle régional aux estimations statistiques locales déduites des chroniques d'observation. La figure 1 compare les pluies journalières décennales sur les 80 postes du réseau qui ont servi au calage de la méthode. Les résultats sont jugés

satisfaisants et ne montrent pas de tendance à la sous ou surestimation ; remarquons que le modèle reproduit bien la forte variabilité spatiale des quantiles de pluie journalière qui varient entre 60 et 280 mm.

Les 9 postes pluviographiques comparés sur la figure 2 n'ont pas été directement utilisés lors du calage. On constate ici aussi, une bonne restitution des quantiles décennaux des pluies horaires et journalières.

### Les quantiles de débit

Les résultats obtenus par modélisation reposent sur la connaissance spatiale de la pluie et sur une fonction de production spatiale conditionnée par la géologie et l'occupation de l'espace. Les performances de la modélisation peuvent être contrôlées sur les bassins versants instrumentés par la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN). Le contrôle est présenté figures 3 et 4 pour les débits journaliers et pour les débits de pointe de fréquence décennale. On note une dispersion assez forte des résultats, autour de la bissectrice, avec une tendance générale à la surestimation. Pour les débits journaliers et les débits de pointe décennaux le rapport moyen entre les estimations par modélisation et les estimations statistiques sur les chroniques des débits est de l'ordre de 1,3. La moitié des estimations est dans le ratio 0,7-1,4 pour les débits journaliers et dans une fourchette légèrement plus resserrée (0,8-1,3) pour les débits de pointe de crue.

Cette dispersion n'est pas jugée préoccupante après discussion avec la DIREN qui assure la gestion du réseau de mesure, étant donné les grandes difficultés inhérentes à la mesure des débits sur ces cours d'eau fortement torrentiels. On obtient d'ailleurs une dispersion tout à fait comparable entre les estimations statistiques et des estimations fournies par un modèle simple du genre :  $Q = 1,3 \left( \frac{P}{80} \right)^2 S^{0,8}$ , où P représente la pluie journalière décennale en mm, S la surface du bassin versant en km<sup>2</sup> et Q le débit de pointe (m<sup>3</sup>/s) de fréquence décennale.

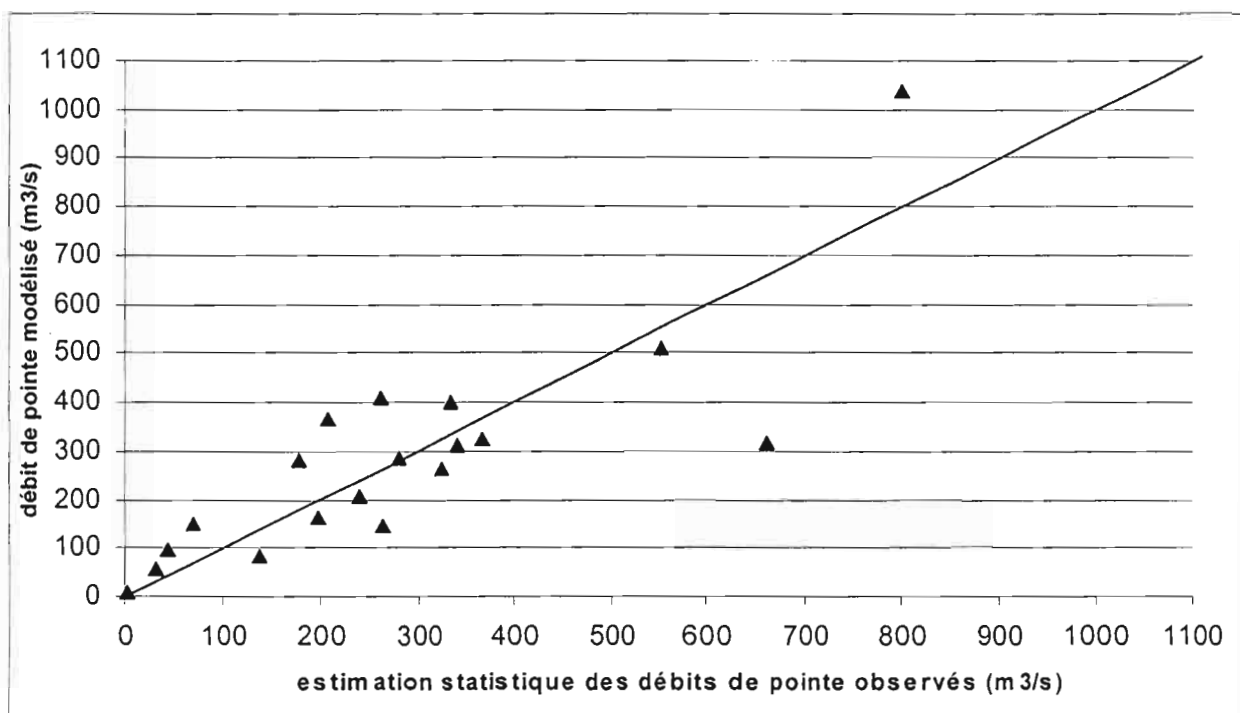


Fig. 3 - Contrôle des performances de la modélisation sur les débits de pointe de fréquence décennale



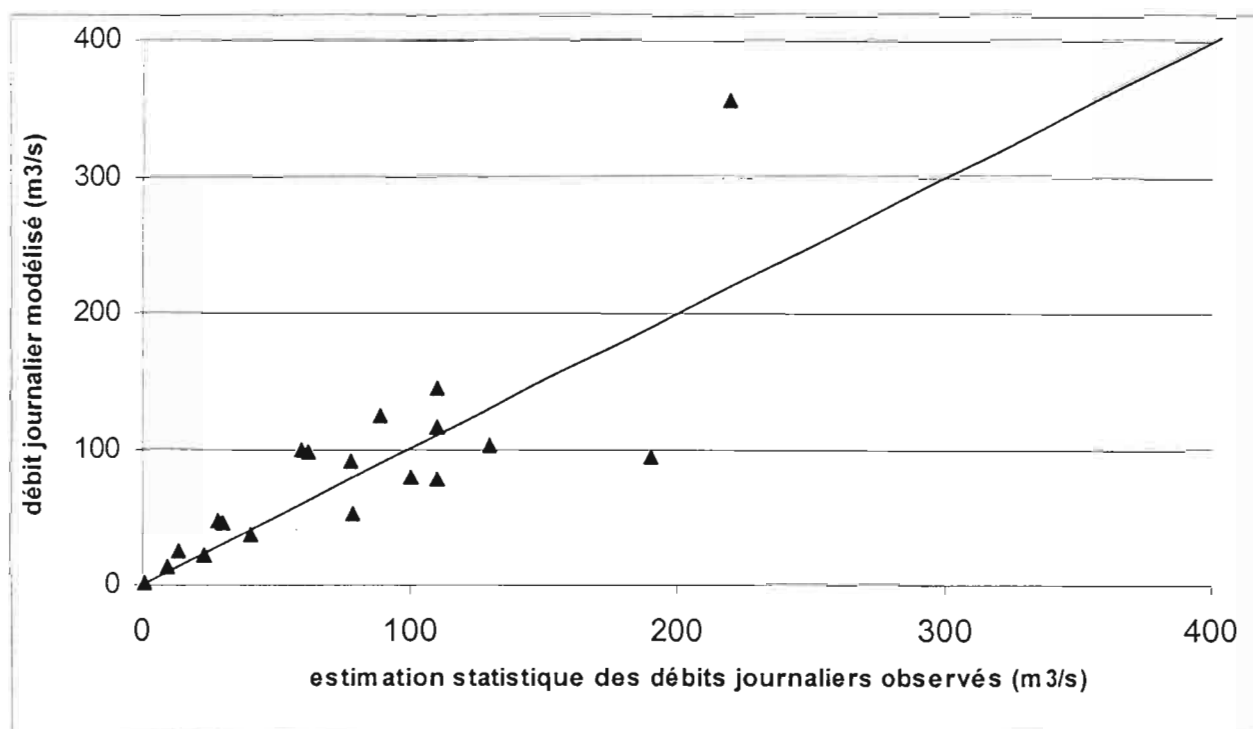


Fig. 4 - Contrôle des performances de la modélisation sur les débits journaliers de fréquence décennale

Cette remarque est-elle rassurante ? Oui, si l'on considère que des approches différentes par modélisation aboutissent à des résultats globalement comparables. Dans ce sens, on considérerait que les écarts sont avant tout dus à l'approche statistique basée sur les chroniques d'observations. Mais inversement ne peut-on aussi conclure que l'on est confronté à une faiblesse des modélisations incapables de prendre en compte les spécificités de certains bassins versants ? Ou à des problèmes d'estimation de la pluie ?

## CONCLUSION

A l'issue de ce travail hydrologique et informatique, la DIREN dispose d'un outil parfaitement opérationnel pour la prédétermination des débits de crue en Corse.

Au lieu et place des simples approches statistiques qui supportent généralement les études de synthèse, nous avons opté pour une méthodologie originale. La méthodologie associe une simulation de pluies horaires à une modélisation de la pluie en débit.

L'intérêt de cette approche est d'obtenir dans la même démarche une estimation des débits de pointe de crue et des débits moyens de différentes durées et ceci dans une vaste plage de fréquence.

La régionalisation de la démarche est supportée par l'information spatiale a priori pertinente : le réseau de mesure Météo France des pluies journalières, les bases de données altimétriques, d'occupation de l'espace, de géologie. Bien entendu l'information débit du réseau de mesure DIREN est utilisée, mais uniquement en contrôle des performances ce qui est parfaitement rigoureux.

L'utilisation de bases de données spatiales nous a naturellement conduit vers l'écriture d'un Système d'Information Géographique. L'outil intègre d'autre part l'application HYDROKIT pour le tracé automatique du bassin versant. Cette délimitation topographique du bassin versant est utilisée pour afficher toutes les informations ponctuelles de la pluie et de débit sur ce bassin ainsi que pour estimer les débits de référence de crue à l'exutoire.

L'utilisateur bénéficie ainsi d'un outil unique qui synthétise l'ensemble de l'information hydrologique de la région d'étude. L'informatisation apporte en outre un confort d'utilisation certain et des gains de temps appréciables pour le rendu des études.

## BIBLIOGRAPHIE

- ARNAUD P., 1997. Modèle de prédétermination de crues basé sur la simulation - Extension de sa zone de validité, paramétrisation horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps. Thèses Doct. Univ. Montpellier II, 286 p.
- ARNAUD P. et LAVABRE J., 1998. Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. Soumis à Journal des Sciences Hydrologiques.
- Cemagref, 1980. Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants. Méthodes SOCOSE et CRUPEDIX
- CERNESSON F., 1993. Modèle simple de prédétermination des crues de fréquences courantes à rares sur petits bassins versants méditerranéens. Thèses Doct. Univ. Montpellier II, 240 p.
- Cernesson F., Lavabre J. & Masson J.M., 1996. *Stochastic model for generating hourly hyetographs. Atmospheric Research*, vol. 42, n°1-4 (1996), p 149-161.
- FOLTON N., LAVABRE J., 1999. Synthèse des crues de la Corse. 1<sup>ème</sup> partie : la pluviométrie. DIREN Corse. 96 p. + annexe.
- FOLTON N., LAVABRE J., 2000. Synthèse des crues de la Corse. 2<sup>ème</sup> partie : les débits et leur modélisation. DIREN Corse. 37 p. + annexe.
- FOLTON N., LAVABRE J., 2000. Synthèse des crues de la Corse. 3<sup>ème</sup> partie : Application SHYPRE sous ARCVIEW. 11 p.
- EDIJATNO et MICHEL C., 1989. Un modèle de pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche. N°2-1989, pages 113-121.
- LEBEL T., 1984. Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant : estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes. Thèses Institut National Polytechnique de Grenoble, 350 p.
- MICHEL, 1989. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. Document Cemagref, groupement Anthony, division "Hydrologie, hydraulique fluviale et souterraine", 528 p.
- MICHEL, 1998. Ecriture informatique du modèle GR3J, Cemagref, groupement d'Antony.
- National Engineering Handbook 1985, Hydrology, United States Department of Agricultura, Soil Conservation Service, SOGREAH, 1967. Evaluation des crues centennales et décennales des petits bassins versants.
- TOURASSE P., 1981. Analyses spatiales et temporelles des précipitations et utilisation opérationnelle dans un système de prévision de crues. Application aux régions cévenoles. Thèses IMG Univ. Scientifique et Médical, Inst. National Polytechnique de Grenoble, 190 p.



# FLOODS OVER THE CALABRIA REGION (ITALY) AND ITS COMPARISON WITH METEOROLOGICAL ASPECTS OF HEAVY RAINFALLS IN CATALONIA (SPAIN)

Rigo, T.\*, Llasat, M.C.\*, Ferrari, E.\*\*\*, Mancuso, P.\*\*\*

\* *Dept. of Astronomy and Meteorology, University of Barcelona, [carmell@am.ub.es](mailto:carmell@am.ub.es)*

\*\* *Dipt. di Difesa del suolo "V. Marone", University of Calabria, [ferrari@dds.unical.it](mailto:ferrari@dds.unical.it)*

## ABSTRACT

On 14<sup>th</sup> October 1996 a heavy storm gave rise to a large flooding in Crotona (Calabria, Italy) producing six casualties. The event was characterised by high intensities (38.8 mm in 20 minutes) and a rainfall of 116.2 mm was recorded in 24 hours. During this day, a heavy rainfall event was also produced in Catalonia (NE of Spain), causing serious damage to property. In this case, more than 130 mm were recorded in 24 hours with a maximum hourly intensity of 71.4 mm/h. Obviously, the convective system responsible of the rainfalls was not the same, but the synoptic situation and other mesoscalar aspects were useful to give place the two events, simultaneously. A similar coincidence was produced in January 1996: during the days 24, 25 and 26, different continuous rainfall events were produced in Calabria and Catalonia, giving place to some landslides and important damages, with a maximum rainfall in 24 h of 140.2 mm. On 28<sup>th</sup> January 1996 a second event, more convective, started in Catalonia and moved, on 30<sup>th</sup> January, to France. During this event, 182.6 mm were recorded in 36 h, with a maximum 5-minutes intensity of 164 mm/h. Between 30<sup>th</sup> January and 4<sup>th</sup> February 1996, a serious rainfall event and floods were produced in Calabria. The present work analyses each one of those events and, taking into account the previous experience about other flood events in those areas, it shows the common features which were responsible of those extreme rainfalls and floods. Although some analysis about the storm tracking of convective systems from Spain to North and Central Italy have been made, this work shows the importance of some meteorological features involved in simultaneous heavy rainfalls produced in so distant places with different climatic features.

## MAIN FEATURES OF THE REGIONS OF CALABRIA AND CATALONIA

Catalonia is located on the Northeast corner of the Iberian Peninsula. Its coastline runs along the NE-SW direction. Its main orographical features are a coastal mountain range with some peaks exceeding 1000 m and the Pyrenees, which lie roughly from W to E along the northern border of Spain. Calabria is a territory mostly mountainous, with some peaks exceeding 2000 m. A little part of it is constituted by short coastal lowlands. The orographic features of this southern region of Italy are quite complex.

Both regions have different topographical features: the coastal planes and the mountainous inland. The surface of both regions is relatively small: Catalonia and Calabria have areas of 30.000 km<sup>2</sup> and 15.000 Llobregat (at centre), Ter (at northern area) and the Ebro, the longest (at south of the region). In general, the rivers of these regions are quite shorts and conduct considerable flows only in the rainy seasons, in comparison with the rivers of others European regions, like the Rhône or the Rin.

In both regions the summer season is generally dry and warm, meanwhile rainfalls are produced especially in autumn and, only in Calabria, in winter. During the rainy season about 70-80 % of the yearly-cumulated rainfall is usually recorded. Convective rainfall events occur every year especially during that season. A disadvantage of the convective storms is the difficulty to forecast them, because the favourable factors can be developed in few hours.

Due to the previous features, the areas with major potential risk of floods are placed near the coast, where slopes are relatively strong and a greater human activity exists.

## GENERAL ASPECTS OF THE FLOOD EVENTS

The flood events can be analysed from many different points of view: meteorological, hydrologic, geologic and others. This is due to the fact that it is necessary the joining of different meteorological and hydrologic ingredients, among others, to produce a flood event (Doswell, 1994):

- Heavy precipitation, with high rainfall rates sustained during long time periods. This implies that:
  - fast ascent of moist air must exist
  - a slow movement of the systems is necessary.
- The region must have suitable hydrologic and geomorphology aspects like:
  - the condition of previous precipitation
  - the topographic relief
  - the land use.

In the Western Mediterranean area, besides the main events with cumulated daily rainfall above 100 or 200 mm, every year local floods occur in the coastal areas, usually linked with the flooding of the small rivers near the littoral mountain range. Two are the main factors (Llasat *et al.*, 1996):

- There exist high sea temperatures in the late summer and the autumn.
- The coastal ranges act as the provider of physical mechanisms to focus convection.
- The elevated number of flood events (more or less important) lead to the conclusion that the study of the heavy rainfalls in the Western Mediterranean area is necessary. There exist many possible classifications of the flood events and many arguments about when a flood event can be considered as catastrophic or not are in the bibliography. In order to have an objective classification of the catastrophic flood events the next criteria have been used (Llasat and Rodriguez, 1992)
  - Cumulated rainfall exceeding 200 mm in almost one place
  - Cumulated rainfall over 100 mm in an area greater than 2000 km<sup>2</sup>
  - Maximum rainfall in 24 hours exceeding 100 mm
  - One or more river floods
  - Important damages and casualties

## A REVIEW OF THE TEMPORAL DISTRIBUTION OF FLOOD EVENTS IN THE STUDIED AREAS

In the last eighty years, many rainfall events affected Catalonia and Calabria. Some of them exceeded 200 mm of precipitation, but only a part of those events can be considered catastrophic. The temporal distribution of the last ones during the 1920-2000 period was studied. It shows the concentration of the greatest number of events in short time periods. For instance, between 1930 and 1938 many catastrophic events were produced in both areas. Also exist other time periods (1940-1943) with an important frequency of observed events, especially in Calabria (Caloiero *et al.*, 1980). However, the year with a maximum of events (1952) does not correspond with one of these periods. In Catalonia, another important period of catastrophic events was recorded in the 80's. In the two last decades were not registered many catastrophic events, with some exceptions like the present year (2000), where two events were produced in Catalonia and another in Calabria.

Having in mind that not all the events with cumulated rainfall above 200 mm are catastrophic and not all the events with great damages have cumulated rainfalls above 200 mm. A table has been created with the intention to analyse the temporal distribution of the catastrophic floods and their features. The main goals of this table are:

- Detection of common events of both regions
- Description of damages and areas affected
- Classification of the heavy rain events and floods

Figure 1 shows the monthly distribution of events with cumulated rainfall greater than 200 mm and the same with the "catastrophic" events. Obviously, it exists more number of heavy rainfall events than catastrophic ones.

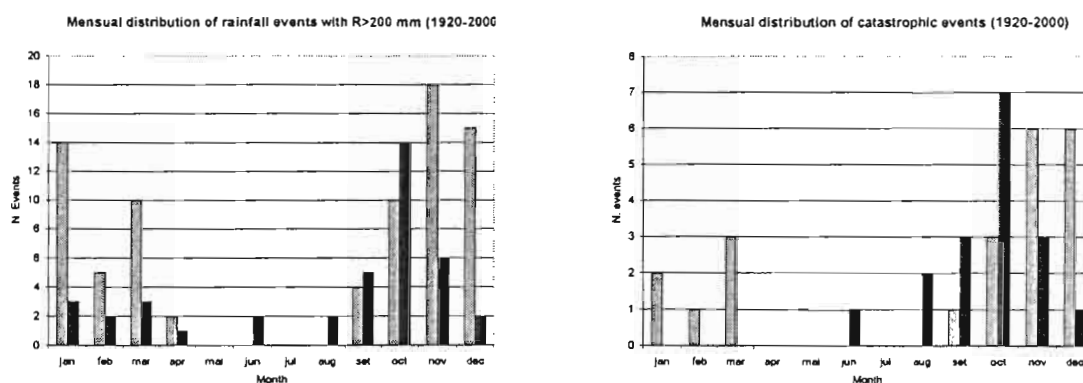


Fig. 1: Monthly distribution of events with  $R > 200$  mm (left) and catastrophic events between 1920 and 2000 (right), for the areas of Calabria (in blue) and Catalonia (in red)

It's easy to observe that November-January is the period of the year with the greatest number of heavy rainfalls events recorded in Calabria. In the same region are more catastrophic events recorded in November and December. Meanwhile, in Catalonia the month with the greater number of events registered is October, followed by November and September. It means that the features favourable for the production of heavy rains are not the same, and, particularly, the role of the Sea Surface Temperature is different (or not are developed at the same season).

Within the list of the catastrophic events, it is possible to select those characterised by an elevated number of casualties. The main ones happened in Catalonia on 25<sup>th</sup> of September 1962 (with 815 casualties), and in Calabria on 21<sup>st</sup> and 22<sup>nd</sup> of October 1953 (more than 100 †). From another point of view, there exist some events to be remembered for the highest values of cumulated rainfalls: i.e., in Catalonia the 17<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> of October 1940 event (with 866.5 mm), and in Calabria the event occurred from the 16<sup>th</sup> to the 18<sup>th</sup> of October 1951, along which 1496.0 mm were recorded.

## AN EXAMPLE OF COMMON RAINFALL EVENT: THE 14<sup>TH</sup> OF OCTOBER 1996

The event of the 14<sup>th</sup> of October 1996 had a typical environment, favourable to the development of heavy rainfalls in the Western Mediterranean. The main features of that event were:

- The existence of a deep low at N of UK, that affected all the Western Mediterranean area, creating an optimal wind configuration: a Southern flow over Catalonia and Calabria. Moreover, it existed high-pressure (anticyclone) at E of Europe, which implied a blockage situation.
- At 500 hPa, a talweg associated to the low affected (this implies that air rises) mainly Catalonia, but also Calabria
- At surface, the low produced warm advection over the northeastern corner of the Iberian Peninsula. In Calabria, the warm advection was produced by the position of an anticyclone located on the North of Africa.
- At 850 hPa, instability increased due to warm and moist advection
- In the low levels of the troposphere existed strong convergence, meanwhile in the upper ones it was areas of important divergence.
- Dry lines appeared near the regions affected by the heavy rains.

The satellite imagery showed (see figure 2):

- Thunderstorms over Catalonia
- The jet stream invading the Western Mediterranean
- A front at E of Italy causing the rise of the air proceeding from the S
- Heavy rainfall in Calabria produced by only one isolated convective system (easily detectable).

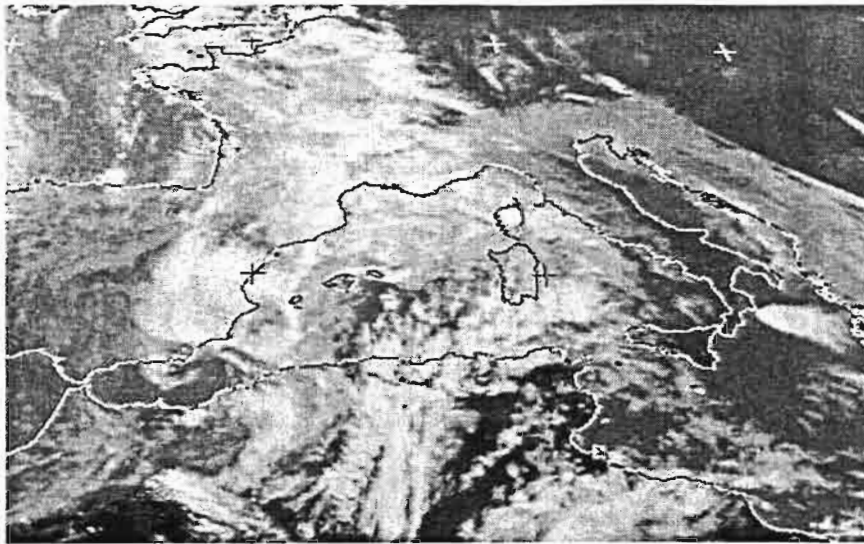


Fig. 2: METEOSAT image of the 14<sup>th</sup> of October 1996 at 12:00 UTC.

The event evolution was quite different in the two areas. In Calabria, the rainfall was due to the arrival of a coherent cloudy mass, characterised by low temperatures, that it moved rapidly from NW to SE. The event produced rainfall values as 63 mm in half an hour (Brasimato station). The atmospheric perturbation reached Crotona (East of the region) causing high rainfall intensities: 38.8 mm in 20 minutes, 72.8 mm in 1 hour and 104.4 mm in 3 hours (Iiritano *et al.*, 1996). At the southern part of the area, 135.4 mm was recorded in 1:40 hour (Gabriele, 1997). The imagery from the satellite shows how heavy rain only affected one small area of the region.

On the other hand, the Catalanian event was not so important. However, it must be remarked that this one can be considered an important event in a period of various years where there did not exist catastrophic events in Catalonia. The maximum total cumulated rainfall registered was 125.8 mm (near to the value of Calabria, but it was registered during a greater period) and a peak of rainfall intensity of 117.6 mm/h during 5 minutes. The main cells were developed at southern areas and were displacing to the NE, affecting the major part of the territory. However, it is possible to observe in the radar imagery (figure 3) how the heaviest rainfall was produced over the sea.

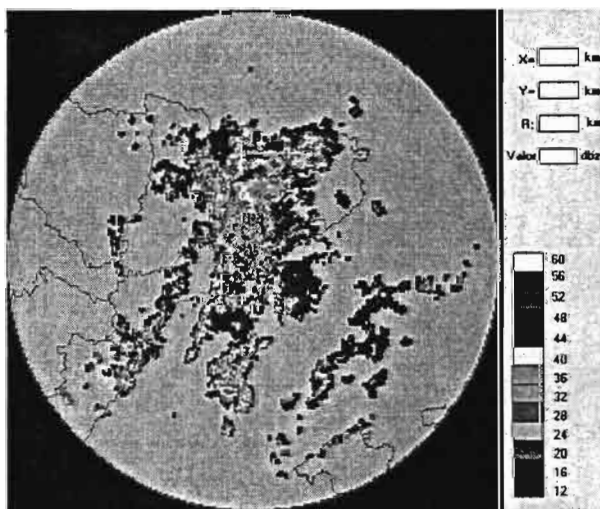


Fig. 3: image of the INM radar of Barcelona (8:30 UTC, 14-10-1996)

The particular analysis of both simultaneous events (using satellite and radar imagery and graphs produced by the rain gauges -figure 4) shows that only one convective system was moving around over the Calabrian area. The rainfall intensity was decreasing with the system movement (the event only affected Calabria during 5 hours, until the storm left the region coming back to the sea). In fact, the rainfall values

could have been greater if the cell had been placed totally over the area (only a few part of it affected Calabria and the rest was placed over the sea).

Moreover, Catalanian event was longer than Calabrian one. However, there were registered lower values of cumulated rainfall (also in this case the main cells were placed over the sea). Another difference was that at least three different clusters of convective cells affected Catalonia, in front of the lonely convective system detected in the Calabrian event.

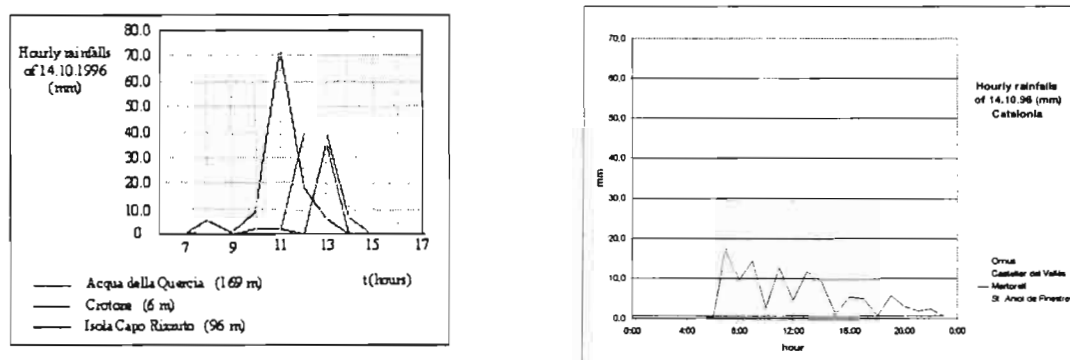


Fig. 4: Hourly rainfall evolution during the 14<sup>th</sup> of October 1996 in various raingauges of Calabria (left) and Catalonia (right)

Rainfall chart of the Catalanian event shows how the mountain areas placed near to the coast were the most affected. That fact implies that orography was necessary to trigger convection (although there was necessary a minor altitude than in another event occurred in January). Also, mountains acted as walls and hindered the movement of the cells. The  $\beta$ -chart (a visual mode to determine the convective areas –the greater is  $\beta$  the more convective is the rainfall) shows how convective rainfall was also allocated over the coastal hilly areas (Llasat *et al.*, 2000). Then, the most convective cells were displaced until they crashed with the hilly ranges.

## CONCLUSIONS

Due to their orographic, geographic and geomorphologic features, Calabria and Catalonia are regions where heavy rainfalls happen quite often. Occasionally, the meteorologic and hydrologic conditions are favourable to the development of floods, which can be catastrophic or not. Moreover, the historical series of catastrophic events show that a great number of casualties have been produced between 1920 and 2000 as a consequence of heavy rains.

Some of the last heavy rainfalls have been analysed with the purpose to obtain some meteorological features. No restriction was applied about the cumulated rainfall or about the fact that the event was catastrophic or not (only the common conditions of heavy rain events and damages). On the same way events of different seasons have been considered (e.g. winter or autumn), with the idea to analyse the common or different features related with the season of the year, although the risk are greater in a determinate season (in both areas, mainly in autumn). With this aim the next events have been analysed:

- 22<sup>nd</sup> to 26<sup>th</sup> of January 1996: an event that affected firstly Catalonia and afterwards the south of Italy
- 28<sup>th</sup> to 31<sup>st</sup> of January 1996: similar event to the previous
- 14<sup>th</sup> of October 1996: a common event to both regions.
- 10<sup>th</sup> of June 2000: an event that only affected Catalonia
- 8<sup>th</sup> to 10<sup>th</sup> of September 2000: an event that only affected Calabria

From the previous list, it is possible to detect winter and autumn events (the first ones produce less catastrophic effects that last ones), common events of both areas, events that affected the areas but with differences in time and finally events that were registered only in one region. It is possible that there are a small number of episodes but it's important that all of them have similar meteorological conditions. However, the mechanisms that produce them are generally not the same for both regions, because it is a long



distance between them. Only for the case that the trough located over Spain is enough deep and the European anticyclone is located towards the NE of Europe the sources will be the same. In general, the position of the Atlantic low will play an important role, because when it is located at the West of the Iberian Peninsula Catalonia is the affected region, meanwhile when it is displaced to the East heavy rains are produced in Calabria. The synoptic chart will change considerably depending on that another factors related to it. For instance, a simple displacement of the area affected by the jet stream can make that both or only one of the regions are under the favourable synoptic conditions, like the existence of divergence and convergence at high and low levels, respectively, or the location of the strongest winds.

Those results follow the other ones showed in other papers about the Western Mediterranean floods (Llasat, 1997, Llasat *et al*, 1996, Ramis *et al*, 1993). The interest of this preliminary work is start the analysis of the synoptic features favourable to the simultaneous production of common events, and the different mesoscalar factors.

From the list of the five events studied, it results interesting that the synoptic configuration never had the same features. For instance, two similar charts were existed for the October 1996 and June 2000 events (a low near the UK and a high over the Eastern Europe) but the position of the talweg was enough to justify the fact that the heavy rains only affected Catalonia in the second case.

Finally, it is important to have in mind if one of the previous conditions was not verified the environment probably not be able to produce convective storms. Also, it is possible that two near places (if the distance is less than 35 km, both have the same synoptic and mesoscalar environments) are not equally affected by the convective cells (due to the extension and the trajectory of the cells). This fact is very important, because implies that, besides their difficult forecast, it is very complex to determine what is the area most affected by heavy rains. Then it results quite complicate to do a correct alert that caution people about the danger.

## REFERENCES

- CALOIERO, D., MERCURI, T. 1980. *Le alluvioni in Calabria dal 1921 al 1970*. CNR-IRPI, Cosenza.
- DOSWELL, Ch.A. III, 1993. Flash flood-producing convective storms: current understanding and research. *Rep. Of the Proc. Of the U.S.-Spain Workshop on Natural Hazards*: 97-107.
- GABRIELE, S. (ed.) 1997. *Crotone e l'evento alluvionale del 14 ottobre 1996*. Pubblic. GNDCI n.1891, CNR-IRPI, Cosenza.
- IIRITANO, G., NICCOLI, R., VERSACE, P., 1996. *Descrizione dell'evento pluviometrico*. Gruppo di lavoro per la raccolta dati dell'inondazione di Crotone del 14.10.1996. Dipartimento della Protezione Civile, SIMN - Dipartimento di Difesa del Suolo, Cosenza.
- LLASAT, M.C., R. RODRIGUEZ, 1992. Extreme rainfall events in Catalonia: The case of 12 November 1988. *Nat. Hazards* 5, 133-151.
- LLASAT, M.C., RAMIS, C. and BARRANTES, J., 1996: The meteorology of high-intensity rainfall events over the West Mediterranean Region. *Remote Sensing Reviews*, 14, 51-90
- LLASAT, M.C. (ed.), 1997: Heavy rains. *FRIEND (Flow Regimes from International Experimental and Network Data) Projects H-5-5 (IHP IV) and I.1 (IHP V)*, chapter 5, 253-300
- LLASAT, M.C., Rigo, T. and Montes, J.M., 2000: Orographic role in the temporal and spatial distribution of precipitation. The case of the internal basins of Catalonia (Spain). *Mediterranean Storms (Proceedings of the EGS Plinius Conference, Maratea, Italy, 14-16 October 1999)*, Ed. Bios, 41-56
- RAMIS, C., M.C. LLASAT, S.ALONSO, 1993: Synoptic aspects of extreme rainfall events in Catalonia. *Annales Geophysicae. Special Issue (XVIII General Assembly). Wiesbaden Sup.1, 11, I, C128*.

# INUNDATION OF FLOODED AREAS IN WESTERN BLACKSEA REGION IN TURKEY USING RS/GIS TECHNIQUES

Şorman A.U.\* , Akyürek\* Z., Doğanoglu\* V.I.

*Middle East Technical University (METU), Civil Engineering Department, 06531 Ankara*

*e-mail : [sorman@metu.edu.tr](mailto:sorman@metu.edu.tr)*

## ABSTRACT

The remote sensing and geographic information systems techniques are supplying new tools for flood inundation studies. RS/GIS techniques are used for the determination of the flood extent in the 20-21 May 1998 flood in Western Black Sea region of Türkiye. Two Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA/AVHRR) satellite images are processed in this study. The images are geocoded, radiometrically and geometrically corrected. Unsupervised and supervised classification techniques are applied to the pre-processed images respectively in order to find out the flooded areas. The classified images are then compared for change detection. Detailed statistical analyses are performed with the results of the classifications. Ground truth observations for accuracy assessment of the classification are prepared as GIS layers after digitizing the land use maps, river networks, city locations and gaging stations. Various overlay analyses and spatial queries are performed for the interpretation of the classified image.

## KEY WORDS

Flood, Remote Sensing, Satellite Image, Supervised Classification

## INTRODUCTION

The study area, called as Filyos and Bartın river basins, affected from the recent flood in May 1998 is located in Western Black Sea region in Turkey. The area is gauged with the stream runoff stations and precipitation measuring stations which are operated by governmental organisations for hydrologic and climatic records.

The objective of this study is to make an overall discussion of the results obtained from supervised classification of NOAA/AVHRR images; so that flood inundated areas within the study area of May 1998 flood can be identified using remote sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) techniques. Two sets of cloud free satellite scenes before and after the major flood which took place on 20-21 May 1998 in Western Black Sea Region are fully processed.

The supervised classification is performed after the selection of the training samples and evaluation of the statistical characteristics of these samples using statistical methods. The signature parameters, the distances between the signatures and the error matrices are searched for separating the various form of land use categories affected from flooding.

## CLASSIFICATION OF SATELLITE IMAGES

An image is comprised of picture elements (pixels) having a digital or numerical record of radiance measurements. These measurements are taken by imaging sensors in platforms (satellites or aircrafts) as they scan the ground below and to either side of the platform. As the platform moves an image of the Earth's surface is built-up by all the pixels in each scan line (Mather, 1989).

Since these images are digital (numerical in nature) they are open to various kinds of processes by the computers to be interpreted more effectively.

Classification is such a numerical processing of the image data (radiance measurements of all the pixels in all bands of the sensor), made in order to associate each pixel in the image to a class that describes a real word object (Lillesand, 1994). For instance, a pixel having radiance measurements of (10,10,200,280,290) in the five bands of the NOAA-14 image is assigned to its most likely class by either of two techniques of classification. In unsupervised classification there is no control of user on selecting the

separable patterns whereas the number of the separable patterns that exist in the image area is known or at least can be estimated in supervised classification. Ideal patterns are formed by estimating the statistical properties of the values of each of these separable patterns.

This can be done by choosing training samples that contain these separable patterns. For example training samples can be taken from the separable parts of the image that are known to be 'vegetation' or 'clear water'. The radiance values of each individual pixel then can be compared with each of these ideal patterns (training samples) and that pixel will be labelled as belonging to the class represented by the most similar pattern.

There are different techniques of supervised classification that the remote sensing softwares support such as Maximum Likelihood, Minimum Distance, Parallelpiped, Mahalonobis Distance techniques. Minimum Distance Technique, that is based on the minimum distance decision rule (also called spectral distance) that calculates the spectral distance between the measurement vector for the candidate pixel and the mean vector for each sample and assigns the candidate pixel to the class having the minimum spectral distance, is used in this study (Mather, 1989).

## PROCEDURES OF CLASSIFICATION PROCESS

Two NOAA/AVHRR-14 satellite images of West Black Sea Region were obtained in order to determine the extent of areas that were affected by the flood occurred in the region on 20-21 May, 1998 by remote sensing techniques. The images were scanned on May 07<sup>th</sup>, 1998 (before the flood) and on May 25<sup>th</sup>, 1998 (after the flood) and this time difference allowed an interpretation of the effects of flood (change detection).

Although the temporal resolution of NOAA-14 images is 12 hours (in other words, same location is scanned by the satellite every 12 hours) and it is possible to receive NOAA images everyday, these images are highly affected from clouds and cloud free images should be selected for a classification procedure. So after an investigation of the available images by checking their quick-looks the images of aforementioned dates are selected as cloud-free images.

The satellite images were received in a raw image and zipped data format. Radiometric and atmospheric calibrations were applied first to the images to correct the deficiencies or flaws that could result from the imaging sensor in the platform(satellite) or from the atmosphere. Then, a geometric correction was applied to geo-reference the images so that the images can be integrated with GIS data.

After this preprocessing, some enhancement techniques were applied to the geometrically corrected image for a better visual appearance and effective interpretation of the image. The images were now ready for the classification starting with selecting the training samples.

For the accuracy assessment of the classified images, the results of the classification should be compared with reference data of the area worked. In a site trip done by the writer and the technical staff of a governmental organization, the coordinates of the stream gaging stations in geographical and Universal Transverse Mercator (UTM) projections are determined by using Global Positioning System (GPS) equipment. The reference data is prepared by digitizing with a GIS software in three different data types:

- Point Data -The coordinates of cities and stream gaging stations
- Line Data- The river network, city boundaries
- Polygon Data-the land use of a part of the Bartın Basin

These data are saved as different layers for overlay analysis using them and the classified thematic image for the determination of the flooded areas.

### Selection of the training samples

Training samples, selected pixels that are extracted from the image to be classified, are used to estimate certain statistical characteristics of the classes to which the pixels are to be allocated. These statistical characteristics vary from one technique of supervised classification to another but generally the mean value, variance, and extreme values are those which are needed to be estimated from the training samples.

In the beginning, the number and location of each separable pattern on the image at least should be estimated, although some of them are clearly distinct such as 'sea' or 'clouds', some visual enhancements like linear stretch or histogram equalization were applied to interpret the image more effectively. A few unsupervised classifications were also done to see the locations of possible earth object classes to take the training samples.

The final set of training samples, or signatures, consists of 10 samples (Table 3.1.1), the minimum distance supervised classification is applied, and 10 different earth objects were identified on the resulting classified image shown in Figure 4.1. The result of the classification will be discussed in later sections, the training samples should be examined first by some tools of the software to measure their classification capability.

*Table 3.1.1 Signature Listing*

SIGNATURE	EARTH OBJECT	COLOUR IN THE IMAGE
SEA	SEA	BLUE
SEDIMENT	SEDIMENT IN THE SEA	DARK BROWN
LAND1	A LANDUSE TYPE	SIENNA
LAND2	A LANDUSE TYPE	CYAN
LAND3	A LANDUSE TYPE	PURPLE
CLOUD1	DENSE CLOUDS	YELLOW
CLOUD2	CLOUDS	YELLOW
FOREST	FOREST	DARK GREEN
SHADOW	PROBABLE SHADOW OF A CLOUD	GREEN
FLOOD	FLOODED AREAS	RED

### Statistical evaluation of the training samples

As mentioned before, the statistical characteristics of the training areas are used to allocate the pixels of the image to the class which they belong to. These statistical characteristics can also be used to evaluate the efficiency of the supervised classification. The values shown in Table 3.2.1 below is an example of such statistical values and can be viewed separately for an evaluation of all the signatures.

*Table 3.2.1 Statistical Values of Signature Flood*

Layer	Minimum	Maximum	Mean	Standart Dev.
1	7.00	13.00	9.134	1.291
2	12.00	20.00	16.216	1.933
3	293.00	305.00	300.351	2.208
4	285.00	297.00	293.575	1.917

Moreover these characteristics can also be used in creating graphs of signature parameters so that one can compare signatures. The graph appear as sets of ellipses that are based on the mean and standard deviation of one signature. For one band pair, comparing these ellipses and examining the overlaps between the ellipses, similar groups of pixels can be extracted. If ellipses do not overlap, then it is understood that each signature represent distinct pixels in the two bands of the band pair that is desirable for a classification, if they overlap each other a modification of the signature set may be needed (ERDAS, 1998). Such an analysis was applied to the signatures of the classified image, the ellipses are plotted for bands 2 and 5 using two standart deviations from the mean. Due to the apparent distinction of ellipses of classes 'cloud 1 and 2' the plot is limited for the other 8 classes. As can be seen from the plot (Figure 3.2.1), the ellipses of 'shadow', 'sea', 'sediment', 'land 1-3' do not overlap and this distinction underlines the fact that the signature sets of these classes were well selected. However, there are overlaps in the ellipses of classes 'flood', 'forest' and land 2' stating that the signature sets of these three classes do not represent distinct pixels. This problem will be faced in the next evaluations of signatures.

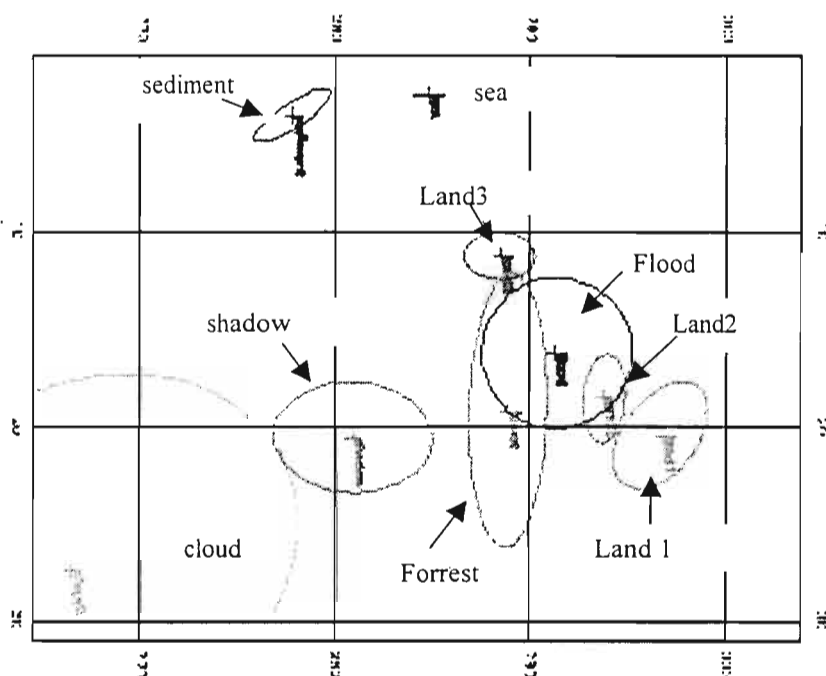


Figure 3.2.1 Scatter Diagram of Bands 2 vs Band 5

The statistical characteristics are also used in the computation of the statistical distance between signatures that can be used again to compare how distinct the signatures are from one another. Euclidian spectral distance is used for our image, and the separability matrix given below in Table 3.2.2 is obtained. The minimum distance (5) is between the flood and the land type 2 as shown in the last column of Table 3, which is in fact expected because as can be seen from the classified image this land type surrounds the rivers in that region (flooded areas) and the reflectance values of these two classes will not be much different. Another small distance (8) is observed between 'forest' and 'flood' meaning that these two classes are not so separable (see overlapping discussion above). The maximum distance (91) is between 'sea' and 'cloud1', and the distances of the other classes with 'cloud1' are also very high. This is expected since the radiance values of clouds are very different from the other classes as stated before in the scatter diagram discussion.

Table 3.2.2 Separability Matrix

	Sea	Sediment	Land1	Land2	Land3	Cloud1	Cloud2	Forest	Shadow	Flood
Sea	0	10	30	24	11	91	43	19	19	21
Sediment		0	37	31	18	86	38	24	19	28
Land1			0	8	20	90	47	16	25	10
Land2				0	13	90	46	9	20	5
Land3					0	89	41	8	14	11
Cloud1						0	53	85	78	88
Cloud2							0	40	30	42
Forest								0	11	8
Shadow									0	17
Flood										0

The separability matrix is helpful in refining the training samples, the training samples having small separabilities can be merged together to form one signature and the number of classified earth objects can be decreased.

## OVERLAYING OF THE CLASSIFIED IMAGES ON LANDUSE MAPS

The classified thematic image of the May 25<sup>th</sup> image is given in Figure 4.1 with the GIS layers (river network, stream gaging stations, city boundaries) prepared as reference data. In the image, it is seen that the sea (blue) is clearly identified (the borders of class 'sea' are consistent with the coastal zone of Black Sea). The observed red pixels along the rivers in the region (Filyos and Bartın) are the flood inundated pixels in the region, this fact is clearly seen when the river network is overlaid on the image as in the Figure 4.1 and also in the query of land use map for alluvial zones in Bartın with the classified image in Figure 4.2. These pixels are not observed on the classified image taken before the flood occurrence. The dark green pixels are allocated to the class 'forest' and this allocation is verified with an overlay analysis with the digitized landuse maps of the region, a query is done for forested area having slope more than 20 % and the result polygons are consistent with class 'forest' as shown in Figure 4.3. The cyan pixels represent a different land type (land 2) and the light green pixels are believed to be a shadow of a cloud or a unrecoverable deficiency in the image since they are not observed in the May 7<sup>th</sup> image.

After the above overlay analyses the classification results given in Table 4.1 seemed to be a successful one and found to be consistent with the ground truth. There were some problems with the signatures of classes 'flood', 'forest' and 'land2' as aforementioned in the preceeding discussions, and these problems will not allow a perfect classification with any classification techniques. A 5% percent of the total 60000 pixels were remained unclassified after the classification with the minimum distance method.

*Table 4.1 Classification Results*

CLASS	Number of Pixels	Percentage %)
SEA	22604	37.67
FOREST	7886	13.14
FLOOD	6617	11.03
CLOUD2	4708	7.85
SHADOW	4442	7.40
LAND2	4404	7.34
LAND1	2435	4.06
LAND3	1931	3.22
CLOUD1	1567	2.61
SEDIMENT	666	1.11
UNCLASSIFIED	2740	4.57

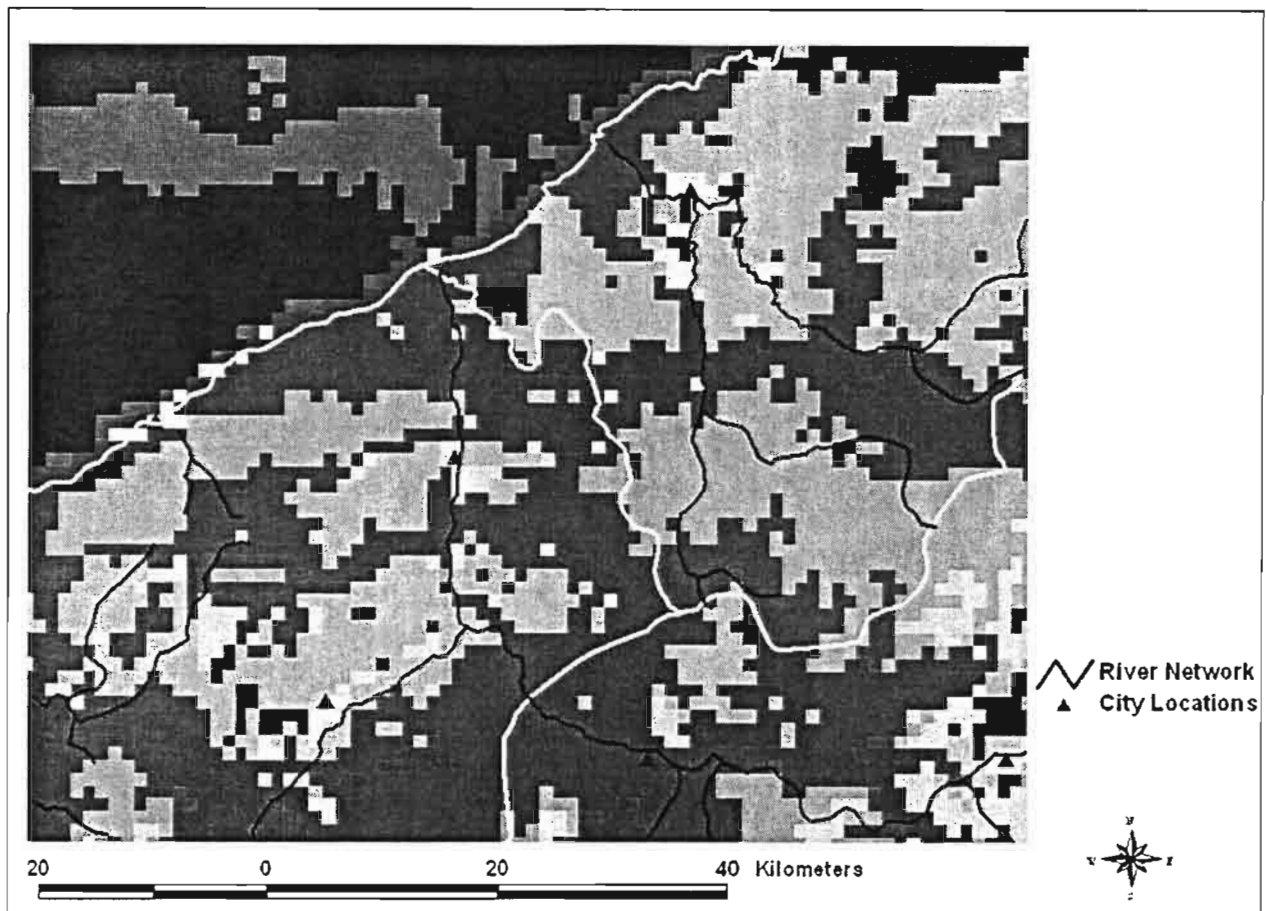


Figure 4.1 Classified Thematic Image of May 25<sup>th</sup> 1998 (Bartın and Filyos basins)

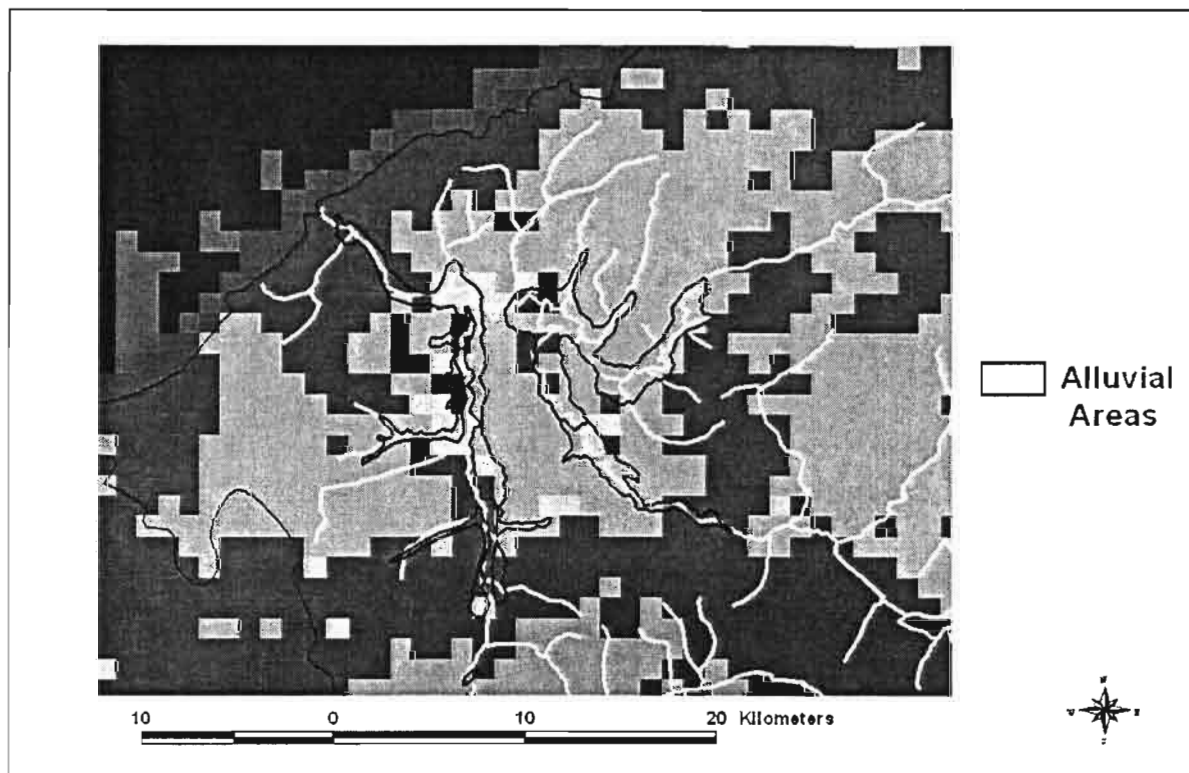


Figure 4.2 Classified Image and Landuse Map of Bartın Basin (Alluvial areas)

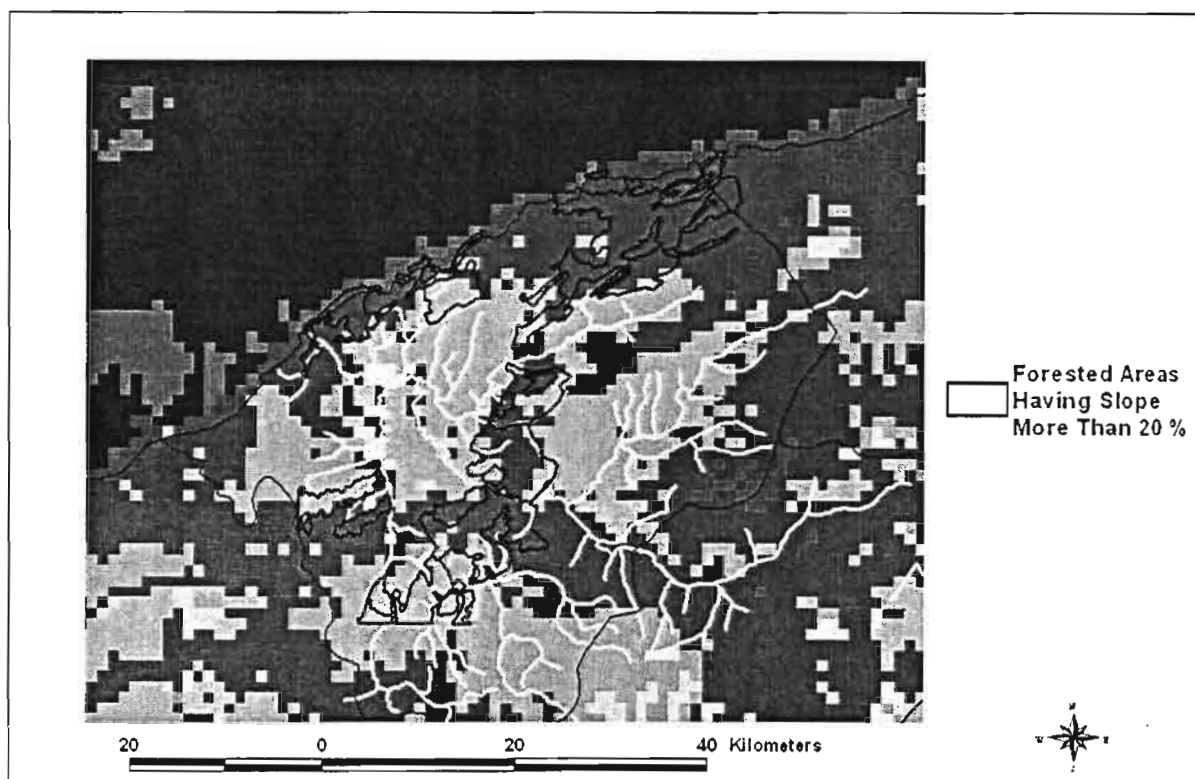


Figure 4.3 Classified Image and Landuse Map of Bartın Basin (Forrested areas)

## 7) CONCLUSIONS

Overlaying of processed images done using various GIS techniques with digitized land use map by several spatial queries is discussed. Detailed analyses are performed with these results of supervised and unsupervised classifications. The percentages of the classified pixels are determined with ten (10) different land classes but some difficulties are encountered with signature of three classes between flooded areas, forest and land use type 2. Ground truth observations are used to check the accuracy of the classification techniques.

Overall, the analysis followed in this research appears to be a successful one, which is consistent with the ground truth records. Due to the scale factor resulting from large spatial resolution (1.1 km \* 1.1 km) of the NOAA images, more refined analysis is needed with a fine spatial resolution of satellite images (Landsat, Spot etc.) in further studies. The procedure can be followed in a similar way for future works in order to determine the flood inundated areas causing several damages of loss of life and property.

## BIBLIOGRAPHY

- ERDAS Imagine Online User Manual, 1998
- Lillesand, T.M and Kiefer. R.W, Remote Sensing and Image Interpretation, John Wiley & Sons, 1994
- Mather, P., Computer Processing of Remotely- Sensed Images, John Wiley & Sons, 1989





# JOINT REGIONAL FLOOD PEAK AND VOLUME FREQUENCY ESTIMATION WITH CANONICAL CORRELATION ANALYSIS

Taha B.M.J. Ouarda\*, Haché M.\*, Bruneau P.\*\* and Bobée B.\*

\* Chair in Statistical Hydrology, INRS-Eau, University of Quebec, 2800 Einstein, C.P. 7500, Ste-Foy, Quebec, G1V 4C7, Canada.

\*\* Hydro-Quebec, 800 Boul. de Maisonneuve Est, 16eme étage, Montreal, Quebec, H2L 1A4

## ABSTRACT

In general, a regional flood frequency procedure consists of two steps: delineation of hydrologically homogeneous regions, and regional estimation. The present paper focuses on the development of a regional flood frequency procedure based on Canonical Correlation Analysis (CCA) and on its application to data from a northern Canadian basin for which floods are dominated by spring snow-melt. The methodology developed was applied to the St-Maurice River basin system, operated by Hydro-Quebec and characterized by the relatively low precision of flow data available. Results show that the proposed method allows for a significant reduction in the 100-year spring flood and volume quantile estimation bias and mean square error.

## KEYWORDS

Regional estimation, spring flood, peak, volume, snow-melt, frequency analysis, quantile, canonical correlation analysis, regression.

## INTRODUCTION

The northern regions of Canada are characterized by very large areas and limited development. Therefore, data are usually only collected at a relatively limited number of sites and often for short durations. It frequently happens that little or no streamflow data is available at a site of interest. In such cases, hydrologists can utilize a regional flood frequency procedure, relying on data available from other stations in the same "hydrologic region". Dalrymple (1960) proposed the index flood method for regional flood estimation. In general, a regional flood frequency procedure consists of two steps:

- Delineation of hydrologically homogeneous regions: that is, identification of stations with similar behavior; and;
- Regional estimation : information transfer from gauged sites to the site of interest (ungauged or gauged site), within the same region.

Homogeneous regions can be defined as fixed regions (contiguous or non-contiguous) or as "neighborhoods" where each target station is associated with its own region. Hydrological neighborhoods can be determined using the region-of-influence method (Burn, 1990) or canonical correlation analysis (CCA) (Cavadias, 1989; Ouarda et al., 1997). Regional flood estimation can be carried out using the index flood method or multiple regression. GREHYS (1996) concluded that CCA yields good results when combined with any of the regional estimation methods that were considered. The results of GREHYS clearly indicated that the "neighborhood" approach (Cavadias, 1989; Burn, 1990) for the delineation of groups of hydrologically homogeneous basins is superior to the "fixed region" approach. Ouarda *et al.* (1997) demonstrated that the multiple regression method and the index flood method give equivalent results when combined with the CCA. Ouarda et al. (1999) presented an automated and transposable regional procedure based on CCA and multiple regression.

In the present paper, further developments and applications of the CCA approach are presented. The general methodology presented herein allows the joint regional estimation of flood peaks and flood volumes and can be extended for the regional estimation of other hydrologic variables of interest (such as low flows or transported sediments). The proposed methodology is applied to the northern St-Maurice River basin where floods are controlled by snow-melt during the spring season.

## THEORETICAL BACKGROUND : NEIGHBORHOOD IDENTIFICATION USING CANONICAL CORRELATION ANALYSIS

Canonical correlation provides the general theoretical framework for various multivariate statistics such as factorial discriminant analysis, multivariate regression, and correspondence analysis. In fact, the techniques of factorial discriminant analysis and multivariate regression represent special cases of the method of canonical correlation analysis. Canonical correlation analysis allows the determination of pairs of canonical variables, such that the correlation between the canonical variables of one pair is maximized, and the correlation between the variables of different pairs is equal to zero. Therefore, it is possible to infer hydrological canonical variables, knowing the physiographical/meteorological canonical variables. A general description of CCA can be found in most textbooks on multivariate statistical analysis (Kshirsagar, 1972; Muirhead, 1982).

Let  $\mathbf{Y}' = (Y_1, \dots, Y_r)$  and  $\mathbf{X}' = (X_1, \dots, X_q)$ ,  $q \geq r$ , be respectively two sets of variables. In the present context the vector  $\mathbf{Y}$  represents hydrological flood characteristics such as flood peak or volume quantiles. The vector  $\mathbf{X}$  is a set of physical and meteorological basin variables. The objective of CCA is, knowing vector  $\mathbf{X}$ , to make inferences about vector  $\mathbf{Y}$ .

The vector  $\mathbf{W}$  of canonical variables from the set of physiographical/meteorological variables, and the vector  $\mathbf{V}$  of canonical variables from the set the hydrological variables, are given by the following linear combinations:

$$\mathbf{W} = \alpha_1 \mathbf{Y}_1 + \dots + \alpha_r \mathbf{Y}_r = \alpha' \mathbf{Y} \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = \beta_1 \mathbf{X}_1 + \dots + \beta_q \mathbf{X}_q = \beta' \mathbf{X} \quad (2)$$

where vectors  $\alpha$  and  $\beta$  are unknown and must be estimated by maximizing the correlation between the random variables  $\mathbf{V}$  and  $\mathbf{W}$  subject to the constraints that  $\mathbf{V}$  and  $\mathbf{W}$  have unit variances. Also,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$  are the  $p$  canonical correlation coefficients between each pair of canonical variables:  $\lambda_i = \text{corr}(\mathbf{W}_i, \mathbf{V}_i)$ ,  $i=1, \dots, p$  and

$$\text{corr}(\mathbf{W}_i, \mathbf{V}_j) = 0, \quad i \neq j$$

The simplifying assumption that the vectors of canonical variables  $\mathbf{W}$  and  $\mathbf{V}$  are jointly  $2p$ -normally distributed is made:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{W} \\ \mathbf{V} \end{pmatrix} \approx N_{2p}(\mathbf{0}, \mathbf{L}) \quad (3)$$

where  $\mathbf{L}$  is the covariance matrix of the canonical variables and is given by :

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_p & \Lambda \\ \Lambda' & \mathbf{I}_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

where  $\mathbf{I}_p$  is the  $p \times p$  identity matrix and  $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p)$ . Under the joint normality assumption, the conditional distribution of  $\mathbf{W}$  given  $\mathbf{V} = \mathbf{v}_0$  is  $p$ -normal and is given by (Muirhead, 1982, p.12):

$$(\mathbf{W} | \mathbf{V} = \mathbf{v}_0) \approx N_p(\Lambda \mathbf{v}_0, \mathbf{I}_p - \Lambda \Lambda') \quad (5)$$

Therefore, physiographically similar basins, represented by a common canonical vector  $\mathbf{V}$ , will in the hydrological canonical space most likely be scattered around a mean position given by  $\Lambda \mathbf{V}$ . The distance to the mean position is governed by the quadratic form of the conditional distribution, which is the Mahalanobis (1936) distance with a  $p$ -degrees of freedom chi-square ( $\chi^2$ ). In a mathematical form, this distance is represented by the following equation :

$$Q = (\mathbf{W} - \Lambda \mathbf{V})' (\mathbf{I}_p - \Lambda \Lambda')^{-1} (\mathbf{W} - \Lambda \mathbf{V}) \quad (6)$$

In practice, two cases can arise : The target-basin (basin to which the information must be transferred from other gauged sites within the neighborhood) can be ungauged or gauged. In the case of ungauged target-basin, no hydrometric data is available. We suppose that the position  $\mathbf{v}_0$  of the target-basin in the  $\mathbf{V}$ -space is known. The mean position of the target-basin in the  $\mathbf{W}$ -space is estimated by  $\Lambda\mathbf{v}_0$ . Consequently, one can define the  $(1-\alpha)$  confidence level neighborhood for an ungauged basin as the set of basins having position  $\mathbf{W}$  in the hydrological canonical space such that:

$$(\mathbf{W} - \hat{\Lambda}\mathbf{v}_0)'(\mathbf{I}_p - \hat{\Lambda}\hat{\Lambda}')^{-1}(\mathbf{W} - \hat{\Lambda}\mathbf{v}_0) \leq \chi_{\alpha,p}^2 \quad (7)$$

where  $\chi_{\alpha,p}^2$  is such that  $P(\chi^2 \leq \chi_{\alpha,p}^2) = 1 - \alpha$ . Equation (7) represents the contour of an ellipsoid centered at  $\Lambda\mathbf{v}_0$ . The orientation of the ellipsoid is given by the diagonal matrix  $\Lambda$ .

In the case of a gauged target-basin, a few years of hydrometric data are used to estimate  $\mathbf{w}_0$  in the  $\mathbf{W}$ -space.. The  $(1-\alpha)$  confidence level neighborhood for a gauged basin is defined as the set of basins for which the position  $\mathbf{W}$  in the hydrological canonical space meets the constraint:

$$(\mathbf{W} - \mathbf{w}_0)'(\mathbf{I}_p - \hat{\Lambda}\hat{\Lambda}')^{-1}(\mathbf{W} - \mathbf{w}_0) \leq \chi_{\alpha,p}^2(\lambda) \quad (9)$$

where  $\chi_{\alpha,p}^2(\lambda)$  is the non-central chi-squared distribution  $\chi_p^2(\lambda)$  and is such that:

$$P(\chi_p^2(\lambda) \leq \chi_{\alpha,p}^2(\lambda)) = 1 - \alpha.$$

The non-centrality parameter is given by :

$$\lambda = (\hat{\Lambda}\mathbf{v}_0 - \mathbf{w}_0)'(\mathbf{I}_p - \hat{\Lambda}\hat{\Lambda}')^{-1}(\hat{\Lambda}\mathbf{v}_0 - \mathbf{w}_0) \quad (10)$$

The determination of the optimal value of parameter  $\alpha$  represents a crucial element in the application of the methodology. The value of  $\alpha$  is directly related to the size of the neighborhood considered for the target basin and to the notion of homogeneity. The bounding value of  $\alpha=0$  corresponds to a neighborhood that includes the whole hydrologic space (all gauged basins). On the other side, when  $\alpha=1$  the ellipsoid degenerates to an empty neighborhood. A procedure for the identification of the optimal number of stations to include in the neighborhood is presented in section 4.

## REGIONAL ESTIMATION METHOD : MULTIPLE REGRESSION

Multiple regression is a simple, fast and flexible method that allows to use a different statistical distribution in each gauged basin. Furthermore, the method is not sensitive to the degree of heterogeneity that may exist within the neighborhood. In practice, the power-form function is the most commonly used model to describe the relationship between the flood or volume quantile ( $Q_T$  or  $V_T$ ) and the hydrometeorological and basin characteristics  $A_1, A_2, \dots, A_n$  for a given region :

$$Q_T = \alpha_0 A_1^{\alpha_1} A_2^{\alpha_2} \dots A_n^{\alpha_n} \varepsilon \quad (11)$$

where  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  are parameters and  $\varepsilon$  is the multiplicative disturbance term. To estimate the parameters, a common procedure consists in linearizing the above equation by a logarithmic transformation :

$$\log(Q_T) = \log(\alpha_0) + \alpha_1 \log(A_1) + \alpha_2 \log(A_2) + \dots + \alpha_n \log(A_n) + \log(\varepsilon) \quad (12)$$

and, then, estimating the parameters of the linearized model by an ordinary least squares or by a generalized least squares technique (Stedinger and Tasker, 1985, 1986). It must be mentioned that this logarithmic transformation approach introduces an additional

## OPTIMAL NUMBER OF STATIONS IN THE NEIGHBORHOOD

The use of geographically defined homogeneous regions is convenient for practical purposes. However, geographical proximity is not a guarantee of hydrological similarity. The CCA method discussed in this paper adopts the hydrologic neighborhood approach to the definition of homogeneous regions. This approach considers each basin as having its own homogeneous region, or neighborhood. To address the trade-off between homogeneity and the amount of observations needed, rational criteria for the identification of the optimal number of stations need to be developed. A jack-knife resampling procedure (Miller, 1964) is used to address the compromise between the conflicting objectives of increasing the degree of similarity between the basins of the neighborhood and increasing the size of the neighborhood itself. Each one of the basins of a data set is in turn considered as an ungauged target basin and removed from the data base. Estimates of quantiles are then obtained in this target basin using the CCA approach coupled with a multiple regression estimation method. Various confidence levels  $100(1-\alpha)\%$  are considered by varying the neighborhood parameter  $\alpha$ . Two performance indices are considered :

$$BIAS(\alpha) = rBIAS_{\alpha} / rBIAS_0 \quad (14)$$

$$MSE(\alpha) = rMSE_{\alpha} / rMSE_0 \quad (15)$$

where  $rBIAS_{\alpha}$  and  $rMSE_{\alpha}$  are respectively the relative bias and the relative mean square error of quantile estimation corresponding to a confidence level of  $100(1-\alpha)\%$ . The case  $\alpha=0$  corresponds to the inclusion of all basins in the neighborhood of the target site. The smaller these two performance indices are, the greater the gain in performance.

## GENERAL REGIONALIZATION METHODOLOGY

The general regionalization methodology adopted in the present study consists of two phases: data base construction and regional estimation. In the first phase, data bases are built and validated. Three general data bases must be constructed: hydrological, meteorological and physiographical data bases. In the first step, the location of the target site (or target sites) must be specified and the relevant gauged stations must be selected. These stations are usually selected based on the quality and quantity of their data and their relative geographical proximity to the target site. In the next step, several statistical tests can be used to test the basic hypothesis of hydrological data: independence, homogeneity and stationarity. Finally, quantile estimates are computed for all target sites. In the second phase the homogeneous neighborhood is identified and the regional estimation of hydrologic variables at the target site is carried out. In the first step the value of the parameter  $\alpha$  is fixed. This can be done based on the jack-knife procedure presented in section 4 as well as the results of previous studies in the region. Finally, the neighborhood is defined and the regional estimation of hydrologic variables is carried out for the target site.

## APPLICATION TO THE ST-MAURICE RIVER BASIN

The St-Maurice River basin is a typical cold region hydrologic basin that is located on the north shore of the St-Lawrence River (Quebec, Canada). The St-Maurice River flows from north to south, with a drainage basin area of approximately 43 000 km<sup>2</sup>. The objective of the present application is not to estimate hydrologic variables in an ungauged site, but rather to compare the performance of the CCA-based regional estimation methodology presented in sections 2 to 5, to the old methodology used by Hydro-Quebec and based on the approach proposed by Dalrymple (1960). This approach uses geographical proximity as a basis for the determination of homogeneous regions, and the index flood method for regional estimation. The comparison of the two approaches is based on two criteria : the estimated relative bias ( $rBIAS$ ) and the estimated relative mean square error ( $rMSE$ ).

A data set of 29 drainage basins located in and around the St-Maurice River basin is used in this study. Only stations with 25 years of hydrometric record or more are considered. Catchments are characterized by the following physiographic and meteorological variables: drainage area  $BV$  (km<sup>2</sup>); slope of the main channel  $PCP$  (m/km); and mean accumulated snow water equivalent on the ground for the 15<sup>th</sup> of

march MNS15 (mm). BV, PCP and MNS15 are the basin physical and meteorological variables that form the matrix **X**. They provide the information about the main physiographical characteristics of the basin and the dominant meteorological phenomena to which it is subject.

The 100-year spring flood peak quantiles ( $Q_{100}$ ) and the 100-year spring flood volume quantiles ( $V_{100}$ ) at the gauged stations are computed using the General Extreme Value (GEV) distribution in association with the Probability Weighted Moments (PWM) estimation method.  $Q_{100}$  and  $V_{100}$  are the hydrological variables that form the matrix **Y**. With  $q=3$  (number of physical/meteorological variables) and  $p=2$  (number of hydrological variables), two pairs of canonical variables can be defined. The estimated canonical correlation coefficients are  $\hat{\lambda}_1 = 0.997$  and  $\hat{\lambda}_2 = 0.632$ . The canonical coefficients for the hydrological and physical variables and the correlation between the canonical variables and the original variables are given in Table 1. Significant correlations at a confident level of 1% are presented in bold in this table. The interpretation of canonical variables can be done using their correlations with the original variables. Table 1 illustrated that the variable V1 essentially represents the size of the basin while V2 represents the mean slope of the basin. Due to the high values of canonical correlations, similar interpretations are also valid for canonical hydrological variables W1 and W2.

TABLE 1 Canonical coefficients and correlations between the canonical variables and the original variables (hydrological and physiographical)

Variable	Correlations				Canonical coefficients			
	V1	V2	W1	W2	V1	V2	W1	W2
$\log(Q_{100})$	<b>-0.93</b>	0.23	<b>-0.93</b>	0.36	-	-	0.25	3.43
$\log(V_{100})$	<b>-0.99</b>	0.05	<b>-1.00</b>	0.07	-	-	-1.24	-3.21
$\log(BV)$	<b>-0.99</b>	-0.10	<b>-0.99</b>	-0.06	-1.05	0.43	-	-
PCP	<b>0.55</b>	<b>0.82</b>	<b>0.55</b>	<b>0.52</b>	-0.12	1.09	-	-
MNS15	<b>-0.60</b>	<b>0.53</b>	<b>-0.60</b>	0.34	-0.02	0.28	-	-

\*Significant correlations at a confident level of 1% are presented in bold

The results of the jack-knife procedure are illustrated in Figure 1 which indicates, in the case of  $Q_{100}$  that the optimal number of stations to include in the neighborhood corresponds to a value of  $\alpha = 0.22$ . In the case of  $V_{100}$ , the optimal value of  $\alpha$  ranges between 0.22 and 0.26. The threshold level that was adopted for the remainder of the study is  $\alpha=0.22$  corresponding to a mean number of neighboring stations of 20.

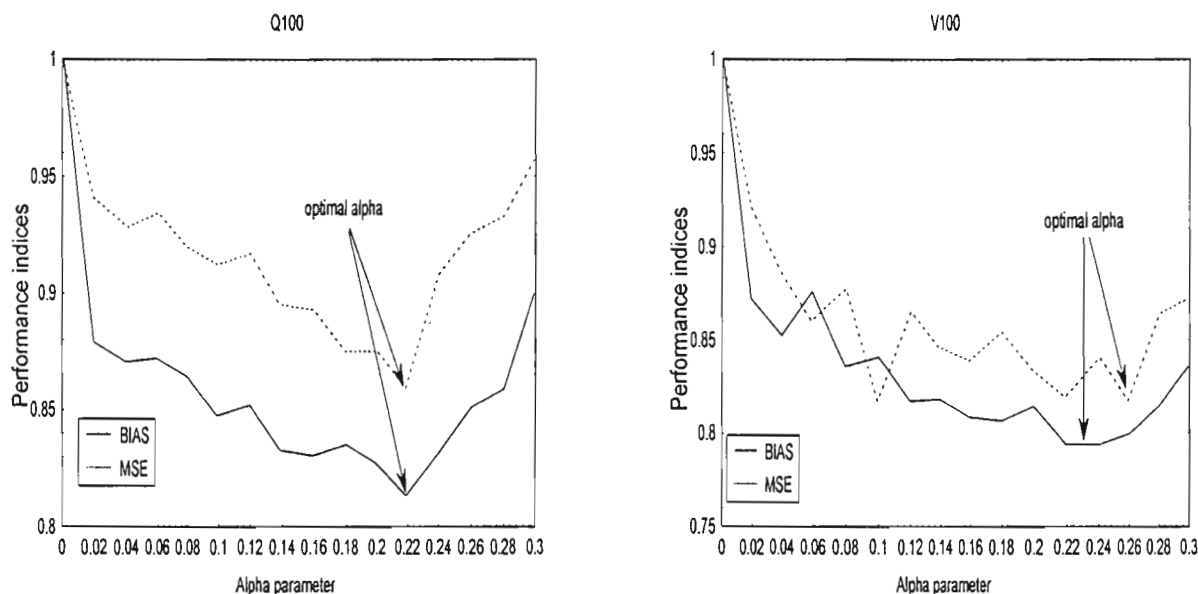


Fig. 1: Optimal value of  $\alpha$  for the 100-year flood quantile ( $Q_{100}$ ) and the 100-year volume quantile ( $V_{100}$ )

Using each computed neighborhood for each gauged site (consecutively considered as an ungauged target station), log-linear multiple regression equations relating the hydrological variables and the meteorological/physiographical variables are developed and estimation is performed for the target basins.

The results of the method proposed in this study (determination of neighborhoods based on canonical correlation analysis and regional estimation using multiple regression) are compared to the Dalrymple method (determination of homogeneous regions based on geographical proximity and regional estimation using the index flood approach) using the two criteria  $rBIAS$  and  $rMSE$ . The criteria are illustrated with the boxplot diagrams for  $Q_{100}$  and  $V_{100}$  in Figures 2 and 3. A boxplot is a graphical display that shows a measurement of location (median), a measurement of dispersion (interquartile range), and the presence of possible outliers. In terms of  $rMSE$  (Figure 3), the method presented in this paper (CCA+MR) leads to a significant improvement in the quantile estimation in comparison with the Dalrymple approach. In term of  $rBIAS$ , there is a slight improvement of the estimate with the CCA+MR method. It must be noted that GREHYS (1996b) showed that the use of multiple regression or the index flood method for regional estimation leads to similar results.

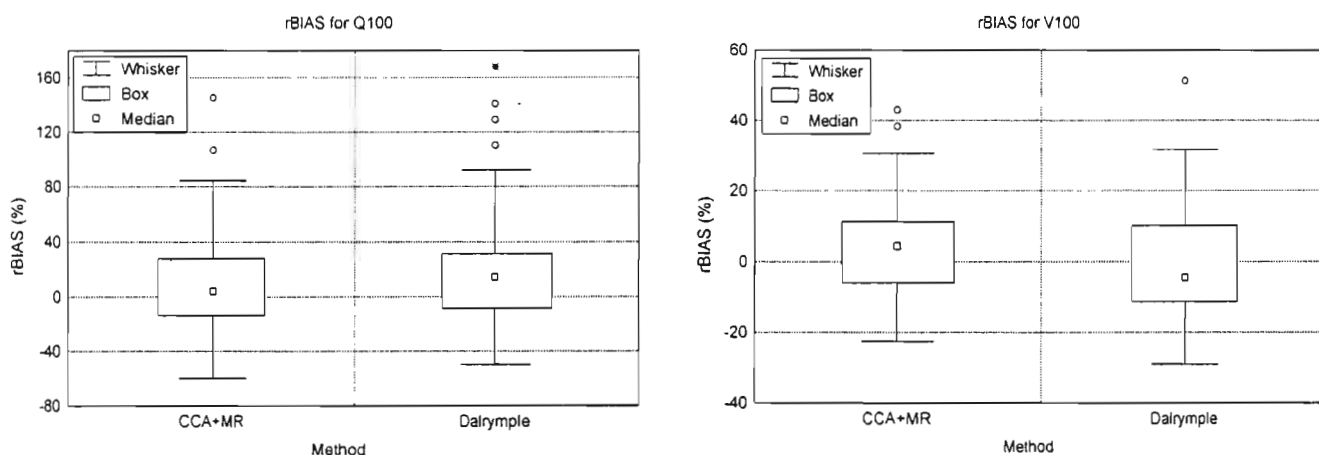


Fig. 2: Boxplots of the relative bias ( $rBIAS$ ) of the 100-year flood quantile ( $Q_{100}$ ) and the 100-year volume quantile ( $V_{100}$ ).

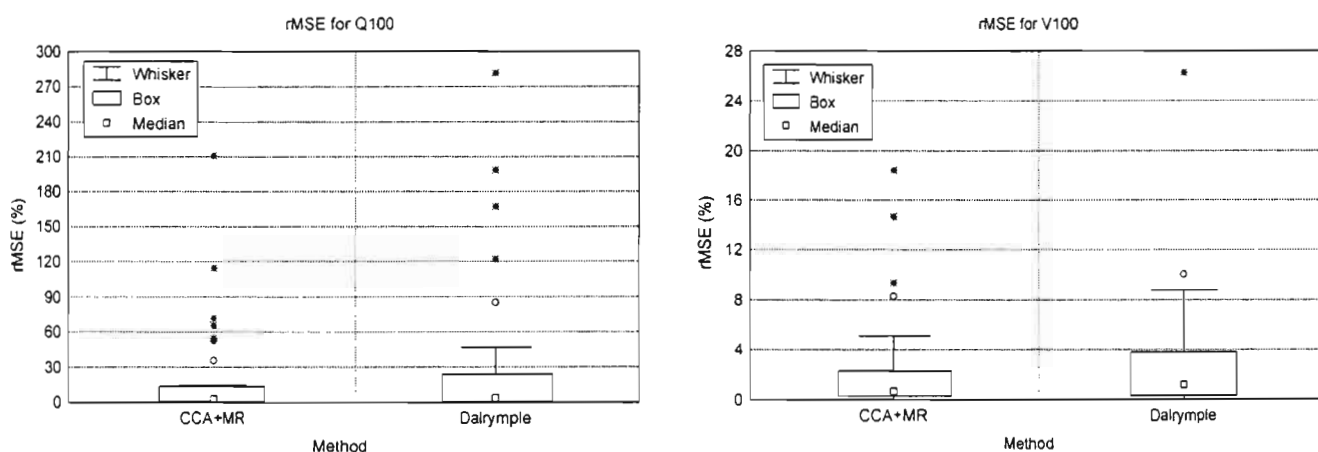


Fig. 3: Boxplots of the relative mean square error ( $rMSE$ ) of the 100-year flood quantile ( $Q_{100}$ ) and the 100-year volume quantile ( $V_{100}$ ).

The present study shows also that, in 60% of cases, the Dalrymple method (which was previously used by Hydro-Quebec) overestimates the  $Q_T$  value, which leads to an over-design of retention structures. Other similar simulations were also carried out to study the impact of using specific variables (variables that are standardised with the basin area). These simulations demonstrated that the use of specific variables leads to better results (smaller values of  $rBIAS$  and  $rMSE$ ).

## CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The purpose of this paper was to present a general approach for regional frequency analysis of hydrologic variables and to apply it to data from a northern Canadian basin. This methodology, based on canonical correlation analysis and multiple regression, allows the joint regional estimation of spring flood peaks and spring flood volumes. Simulations based on the jack-knife resampling technique, associated with a data set of 29 stations from the St-Maurice River basin (Quebec, Canada) were used to illustrate the advantages of the method of canonical correlation analysis, and its usefulness in the regional flood frequency analysis of basins where floods are dominated by spring snow-melt. Results are presented concerning the determination of the optimal number of stations to include in the neighborhood. Analysis of the relative bias and the relative mean square error of the 100-year flood and volume quantiles demonstrated that the method based on canonical correlation analysis leads to better results than a method based on geographic proximity.

## REFERENCES

- BURN, D.H. 1990. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, 26(10): 2257-2265.
- CAVADIAS, G.S. 1989. Regional flood estimation by canonical correlation. 1989 Conference of the Canadian Society of Civil Engineers: 11A:212-231. St-John's, Newfoundland, Canada.
- DALRYMPLE, T. 1960. Flood frequency analysis. U.S. Geological Survey, Water Supply Paper, 1543A.
- GREHYS 1996. Intercomparison of flood frequency procedures for Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, 186(1-4): 85-103.
- KSHIRSAGAR, A.M. 1972. *Multivariate Analysis*. Dekker, New York, 534 pp.
- MAHALANOBIS, P.C., 1936. On the generalized distance in statistics. *Proc. Nat. Inst. Sci. India*, 12:49-55.
- MILLER, R. G. Jr. 1964. A trustworthy Jack-knife, *The Annals of Math. Statistics*, 35(4): 1594-1605.
- MUIRHEAD, R.J., 1982. *Aspect of Multivariate Statistical Theory*. J. Wiley, 673 pp.
- OUARDA T.B.M.J., BOUCHER, G., RASMUSSEN, P.F., BOBEE, B. 1997. Regionalization of floods by canonical analysis. In "Operational Water Management", J.C. Refsgaard and E.A. Karalis Eds., A.A. Balkema Pub. Rotterdam, 297-302.
- OUARDA T.B.M.J., LANG, M., BOBÉE, B., BERNIER, J., BOIS, P. 1999. Analysis of regional flood models utilized in France and Quebec, *Rev. Sci. Eau*, 12(1): 155-182.
- STEDINGER, J.R., TASKER, G. 1985. Regional hydrological analysis, 1, ordinary, weighted, and generalized least squares compared. *Water Resour. Res.*, 21(9):1421-1432.
- STEDINGER, J.R., TASKER, G. 1986. Regional hydrological analysis, 2, model-error estimators, estimation of sigma and log Pearson type 3 distributions. *Water Resour. Res.*, 22(10):1487-1499.





## **ANNEXE**

### **LISTE DES PARTICIPANTS**

Mohamed	ACHITE	Université des Sciences et de la Technologie d'Oran	Dép. d'Hydraulique-Faculté de Génie Civil et d'Architecture	Algérie
Mohamed	ALAMI MEJJATI	Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II	DSS-BP 6202-Rabat	Maroc
Jean	ALBERGEL	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie
Patrick	ANDRIEUX	Institut National de la Recherche Agronomique-UMR Sciences du Sol	2, place Viala-34060 Montpellier	France
Sandra	ARDOIN	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Patrick	ARNAUD	UMI-UMR Hydrosociétés Montpellier	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Eram	ARTINIAN	Institut de Recherche pour le Développement-MED-HYCOS	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	Bulgarie
Michel	BAKALOWICZ	UMI-UMR Hydrosociétés Montpellier	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Bernard	BARTHES	Institut de Recherche pour le Développement	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Abdellaoui	BEN YOUNES	Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II	DSS-BP 6202-Rabat	Maroc
Mohamed	BEN YOUNES LOUATI	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie
Mekki	BEN YOUSSEF	Ministère de l'Agriculture-D/CES	Tunis-30, av. A, Savary-1002 Tunis le Belvédère	Tunisie
Ronny	BERNDTSSON	Lund University	Dep. Of Water Resources Engineering-box 118-S-221 00 Lund	Suède
Wanda	BEROLO	UMR 5651 du CNRS "ESPACE"-Dep. de Géographie et Aménagement	98, bd. E. Herriot-BP 3209-06204 Nice cedex 03	France
Mustapha	BESBES	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunisie-Lab. d'Hydraulique	BP 37-Le Belvédère-1002 Tunis	Tunisie
Fabienne	BIDI	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Mr	BLAIR	Ecology and Environment, Inc	67, av. Fal Ould Omeir-Rabat-Agdal	Maroc
Didier	BLAVET	Institut de Recherche pour le Développement	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
François	BOCQUEE	O.R.E.	Bd. de la Providence-Saint-Denis 97489	Ile de la Réunion

Claude	BOCQUILLON	Université Montpellier II	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Mike	BONELL	UNESCO-Division des Sciences de l'Eau	1, rue Miollis-75015 Paris	France
Mohamed	BOUFAROUA	Ministère de l'Agriculture-D/CES	Tunis-30, av. A, Savary-1002 Tunis le Belvédère	Tunisie
Jacques	BOURGES	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	France
Téléspore	BROU YAO	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	Côte d'Ivoire
Jean-Pierre	BRUNEL	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Atil	BULU	Istanbul Technical University-Civil Engineering Faculty-Dep. of Hydraulics	80626 Ayazaga Istanbul	Turquie
Eric	CADIER	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Roger	CALVEZ	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie
Paul	CARRE	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Julie	CHARLEUX	UMR 3S-Structures et Systèmes Spatiaux Cemagref-Engref	500, rue J.F. Breton-34093 Montpellier cedex 5	France
Philippe	CHAUVELON	Fondation Sansouire-Station biologique de la Tour du Valat	Le Sambuc-13200 Arles	France
Pierre	CHEVALLIER	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Roland	CLAUDET	Direction Régionale de l'Environnement du Languedoc-Roussillon		France
Jacques	CLAUDE	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie
J.M.	CLERC	CRITT VERSEAU	Domaine de Lavalette-859, rue J.F. Breton-34093 Montpellier cedex 5	France
Angela	CORINA	Universita'degli Studi della Calabria-Dip. Difesa del Suolo	S. Antonello Montalto Uffogo Scalo-87040 Cosenza	Italie
Antoine	CORNET	Institut de Recherche pour le Développement	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France

Claude	COSANDEY	CNRS-Laboratoire de Géographie physique "PIERRE BIROT"	1 place A. Briand-92190 Meudon	France
Christophe	CUDENNEC	Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes-Lab. Physique et Génie Rural	65, rue de Saint-Brieuc-35042 Rennes cedex	France
Snejana	DAKOVA	Institut National de Météorologie et Hydrologie	Bl. Tzarigradski 66-1784 Sofia	Bulgarie
Ali	DEBEBRIA	Ministère de l'Agriculture-Direction C.E.S.	30, rue A. Savary-1002 Tunis	Tunisie
Siegfried	DEMUTH	University of Freiburg-Dep. of Hydrology	Werderring 4-79085 Freiburg	Allemagne
Michel	DESBORDES	UMII-UMR Hydrosociences Montpellier	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Alain	DEZETTER	Institut de Recherche pour le Développement- MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
François	DIDON-LESCOT	UMR 5651 du CNRS "ESPACE"-Dep. De Géographie et Aménagement	98, bd. E. Herriot-BP 3209-06204 Nice cedex 03	France
Veisel	DOGANOGLU	M.E.T.U-Civil Engineering Dep.-Water Resources Lab.	Ankara 06531	Turquie
Bouttheina	DRIDI	CEREG-UMR 7007 CNRS-ULP-ENGES	Institut de Géographie-3, rue de l'Argonne- 67000 Strasbourg	France
Françoise	ELBAZ-POULICHET	UMII-UMR Hydrosociences Montpellier	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Ennio	FERRARI	Universita'degli Studi della Calabria-Dip. Difesa del Suolo	S. Antonello Montalto Uffogo Scalo-87040 Cosenza	Italie
Sarah	FEUILLETTE	Institut de Recherche pour le Développement- Lab. d'Informatique appliquée	32, av. H. Varagnat-93143 Bondy cedex	France
Philippe	GARETTA	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie
Deborah	GAY	LHGI-UMR "Orsay Terre" CNRS-Université Paris Sud	bât. 504-91405 Orsay cedex	France
Michel	GIROD	Maison des Sciences de l'Eau	place E. Bataillon-Case MSE-34095 Montpellier cedex 05	France
Frédéric	GOGIEN	Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes-Lab. Physique et Génie Rural	65, rue de Saint-Brieuc-35042 Rennes cedex	France
Olivier	GRUNBERGER	Institut de Recherche pour le Développement	32, av. H. Varagnat-93143 Bondy cedex	France

Hamadi	HABAIEB	Institut National Agronomique de Tunisie	43, av. Charles Nicolle-1082 cité El Mahragène	Tunisie
Nilgun	HARMANCIOGLU	Dokuz Eylul University- Faculty of Engineering-Dep. Of Civil Engineering	Tinaztepe Campus-35160 Buca Izmir	Turquie
Olivier	HEBRARD	INRA	2, place Viala-34060 Montpellier	France
Habib	HELLALI	Ministère de l'Agriculture-D/CES	Tunis-30, av. A, Savary-1002 Tunis le Belvédère	Tunisie
Alain	HUSSARD	Groupe SIEE	335, av. du Château d'Ô-34090 Montpellier	France
M.	INDARTO	UMR 3S-Structures et Systèmes Spatiaux Cemagref-Engref	500, rue J.F. Breton-34093 Montpellier cedex 5	France
Zakia	JENHAOUI	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie
J.Olivier	JOB	Université St Joseph-Faculté d'Ingénierie-Centre Régional de l'Eau et de l'Environnement	BP 1514-Beyrouth	Liban
Sahira	JOUNDI	Ecole Mohammadia d'Ingénieurs-Lab. d'Analyses des Systèmes Hydrauliques-Dep. Génie Civil	Rabat	Maroc
Ahmadi	KINGUMBI	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunisie	BP 37-Le Belvédère-1002 Tunis	Tunisie
Jean	KHOURI	The Arab Center for the Studies of Arid zones and Dry lands	PO Box 2440-Damas	Syrie
Patrick	LACHASSAGNE	BRGM-Service Eau/RMD	1039, rue de Pinville-34000 Montpellier	France
Patrick	LE GOULVEN	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie
Philippe	LE GRUSSE	CIHEAM-IAMM	3191, route de Mende-34090 Montpellier	France
Fethi	LEBDI	Institut National Agronomique de Tunisie	43, av. Charles Nicolle-1082 cité El Mahragène	Tunisie
Luc	LEBRETON		21 Mail Pierre Charlot-41000 BLOIS	France
Jacques	LEMOALLE	Institut de Recherche pour le Développement	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Yann	L'HOTE	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Maria-Carmen	LLASAT	Université de Barcelone-Dep. d'Astronomie et de Météorologie	Av. Diagonal 647-08028 Barcelone	Espagne
Marc	LOINTIER	Maison de la Télédétection	500, rue J.F. Breton-34093 Montpellier cedex	France

Taoufik	MANSOURI	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie
Jean	MARGAT	AIH France et Plan bleu	403, rue de la Gare-45590 Saint-Cyr en Val	France
Jean-Pierre	MONTOROI	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie
Marc	MORELL	Institut de Recherche pour le Développement-MED-HYCOS	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Felix	MORENO	Instituto de Recursos Naturales y Agrobiologia de Sevilla	Av. Reina Mercedes-Ap. 1052-41080 Séville	Espagne
Roger	MOUSSA	Institut National de la Recherche Agronomique-UMR Sciences du Sol	2, place Viala-34060 Montpellier	France
Wajdi	NAJEM	Université St Joseph-Faculté d'Ingénierie-Centre Régional de l'Eau et de l'Environnement	BP 1514-Beyrouth	Liban
Slah	NASRI	Institut National de la Recherche du Génie Rural des Eaux et Forêts		Tunisie
Yahaya	NAZOU MOU	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunisie-Lab. d'Hydraulique	BP 37-Le Belvédère-1002 Tunis	Tunisie
Luc	NEPPEL	UMI-UMR Hydrosociétés Montpellier	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Hélène	NIEL	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
E. Beyhan	OGUZ	Istanbul Technical University-Civil Engineering Faculty-Dep. of Hydraulics	80626 Ayazaga Istanbul	Turquie
Bihret	ONUZ	Istanbul Technical University-Civil Engineering Faculty-Dep. of Hydraulics	80626 Ayazaga Istanbul	Turquie
Taha	OUARDA	INRS-Eau	2800 Einstein-CP 7500-Sainte-Foy-Quebec-G1V4C7	Canada
Sevinc	OZKUL	Dokuz Eylul University- Faculty of Engineering-Dep. Of Civil Engineering	Tinaztepe Campus-35160 Buca Izmir	Turquie
John	PASCH	Ecology and Environment, Inc	67, av. Fal Ould Omeir-Rabat-Agdal	Maroc
Sylvain	PAYRAUDEAU	UMR 3S-Structures et Systèmes Spatiaux Cemagref-Engref	500, rue J.F. Breton-34093 Montpellier cedex 5	
Yannick	PEPIN	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie

J.Louis	PERRIN	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Gregor	PETKOVSEK	Université de Ljubljana-Faculty of Civil and Geodetic Engineering-Hydraulic Department	Jamova 2-1000 Ljubljana	Slovenie
J.Louis	PINAULT	BRGM-Service Eau/RMD	1039, rue de Pinville-34000 Montpellier	France
Christian	PRAT	Maison de la Télédétection	500, rue J.F. Breton-34093 Montpellier cedex 5	France
Jean-Christophe	POUGET	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Christian	PUECH	Cemagref Engref Montpellier-UMR 3S	Maison de la Télédétection-500, rue J.F. Breton-34093 Montpellier cedex 5	France
Ayman	RABI	Palestinian Hydrology Group-Generale des Eaux/Khatib et Alami	PO Box 25220-Shu'fat-Jerusalem	Palestinian Territories
Zoran	RADIC	Université de Belgrade-Faculty of Civil Engineering	Bul. Revolucije73-PO Box 895-11000 Belgrade	Yougoslavie
Ragab	RAGAB	Center for Ecology and Hydrology	Wallingford-OXON-OX10 8BB	Grande Bretagne
Samira	RAIS	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunisie	BP 37-Le Belvédère-1002 Tunis	Tunisie
Yasmina	RAKEM	CEREV-ENPC	6-8 avenue Blaise Pascal-Cité Descartes-Champs sur Marne-77455 Marne La Vallée	France
Pierre	RIBSTEIN	Université P. et M. Curie-Lab. de Géologie Appliquée	Case 123-4, place Jussieu-75252 Paris cedex 05	France
Claire	RODIER	UMII-UMR Hydrosiences Montpellier	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Eric	ROOSE	Institut de Recherche pour le Développement	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Alix	ROUMAGNAC	Bas Rhône Languedoc	1105, av. P.Mendes-France-BP 4001-30001 Nîmes cedex 5	France
Christian	SALLES	UMII-UMR Hydrosiences Montpellier-MSE	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Maria-joao	SANTOS	INAG-Portuguese Institute for Water	Av. Almirante Gago Coutinho 30-1049-066 Lisbonne	Portugal



Janine	SAURIN	UMII-UMR Hydrosociences Montpellier-MSE	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Luc	SEGUIS	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
J.Luc	SEIDEL	UMII-UMR Hydrosociences Montpellier-MSE	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Agim	SELENICA	Institut de Recherche pour le Développement-MED-HYCOS	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	Albanie
Eric	SERVAT	Institut de Recherche pour le Développement-MSE	BP. 5045-34032 Montpellier cedex 1	France
Unal	SORMAN	M.E.T.U-Civil Engineering Dep.-Water Resources Lab.	Ankara 06531	Turquie
Viorel-Alexandru	STANESCU	National Institute of Meteorology and Hydrology-Network and Methodological Lab.	97 Sos Bucuresti-Ploiesti-Secteur 1-71552 Bucharest	Roumanie
Jean-Pierre	THIEBAUD	Institut de Recherche pour le Développement	Grenoble	France
Ahmed	TERFOUS	Université Aboubakr Belkaid Tlemcen	Dép. d'Hydraulique-Faculté des Sciences de l'Ingénieur-BP. 119-Tlemcen 13000	Algérie
Benina	TOUAIBIA	Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique	Laboratoire d'Hydrologie-BP 31-Blida	Algérie
Marie-George	TOURNOUD	UMII-UMR Hydrosociences Montpellier	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Marios	VAFIADIS	Aristotle University of Thessaloniki-Civil Engineering Dep.-Division of Hydraulics and Environmental Engineering	54006 Thessalonique	Grèce
Sandra	VAN EXTER	UMII-UMR Hydrosociences Montpellier-MSE	place E. Bataillon-CC57-34095 Montpellier cedex 05	France
Philippe	WENG	BRGM-Service Eau/RMD	1039, rue de Pinville-34000 Montpellier	France
Yadh	ZAHAR	Faculté de la Manouba	dép. de Géographie-2010 La Manouba	Tunisie
Patrick	ZANTE	Institut de Recherche pour le Développement	BP 434- 1004 Tunis El Menzah IV	Tunisie

**AVL - DIFFUSION**  
**Parc Euromédecine**  
**1027 rue de la Croix Verte**  
**34198 - MONTPELLIER CEDEX 5**  
**Tél : 04 99 23 25 04**  
**Fax : 04 99 23 25 05**

ה

ב

פ